



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

**D18-仿生材料**  
**D18-Bio-inspired Materials**

**Organized by**

Chinese Materials Research Society

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

## D18. 仿生材料

分会主席：俞书宏、江雷、傅正义、唐智勇

### D18-01

#### 生物过程启示的材料合成与制备新技术

傅正义\*<sup>1</sup>

##### 1. 武汉理工大学

自然物质可以在室温下完成制造过程，生长出精妙的微结构，得到独特的功能。我们认为自然物质精妙的制造过程值得学习，以发展材料制备新技术。为此，提出了一个新研究方向“生物过程启示的制备技术 (Bioprocessing-inspired fabrication)”，其主要思想是：从自然物质的制造过程中得到启示和灵感，发展材料合成与制备新技术。“仿生材料”是学习自然生物结构、或者生物结构/性能的关系。“生物过程启示的制备技术”主要是学习自然制造过程、或者自然制造过程/生物结构的关系，从而发展和创新材料合成与制备技术。值得学习的典型自然制造方法包括：生物矿化过程、光合过程和其它生物过程。本报告将介绍我们在此前沿领域开展的若干探索性工作。

### D18-02

#### 仿生自成熟矿化体系介导的釉质修复及其机制研究

牛丽娜\*<sup>1</sup>, 慕昭<sup>2</sup>, 雷晨<sup>1</sup>

1. 口腔系统重建与再生全国重点实验室，国家口腔疾病临床医学研究中心，陕西省口腔医学重点实验室，第四军医大学口腔医院修复科
2. 口腔系统重建与再生全国重点实验室摘要内容

**【目的】**及时有效的釉质修复对于维持牙齿健康、控制龋病进展尤为重要。目前研究往往忽视了再矿化修复层中的有机物残留问题，造成釉质结构再生困难及性能恢复不足。如何有效去除结晶后的有机物残留，实现釉质的结构重构与功能再现是目前釉质仿生修复领域亟需解决的关键问题。本课题首次借鉴天然釉质成熟过程，结合核糖核酸 (RNA) 的特殊性质，提出了一种新型的牙釉质仿生矿化体系，由 RNA 稳定的无定形磷酸钙 (RNA-ACP) 协同核糖核酸酶 (RNase) 构成，以期能够同时实现有机物自发清除以及釉质结构和性能的双重修复。

**【材料及方法】**体外使用 37% 磷酸酸蚀牙釉质片，在其表面构建 RNA-ACP 无定形层，随后在含有 RNA 酶的人工唾液中诱导其相变，形成一层类釉柱晶体。运用 SEM/AFM/FTIR/XRD/CLSM/纳米压痕/纳米划痕等分别检测在体外和大鼠体内的矿化效果。此外，运用分子动力学模拟技术探索由 RNase 介导的仿生自成熟过程的具体作用机制。

**【结果】**该体系在体内外环境均能诱导形成无有机物残留、与基底釉质紧密结合、并且有序排列的类釉质晶体结构，同时实现釉质各项性能的有效恢复。机制研究显示，RNase 降解 RNA 引发 ACP 结构重排，促使有机物提前排除，进而促进晶体横向生长，从而诱导形成更加致密、无有机残留的类釉柱晶体再生。

**【结论】**本研究构建的新型仿生自成熟矿化体系能够自发清除有机占位、诱导结构性釉质晶体再生并实现各项釉质性能的有效恢复，具有较好的临床应用前景。这一研究为早期釉质龋的预防及治疗提供了一种更为经济、仿生的方案。

**D18-03****生超浸润界面体系——基于量子限域超流的能量转换/化学反应/信息传输**江雷\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院理化技术研究所

**D18-04****仿生智能微纳通道材料与器件**闻利平\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院理化技术研究所

通过从自然界汲取灵感，我们能够获得构建智能器件的创新思路，以满足日益增长的先进材料需求。我们团队以生物离子通道为设计蓝本，结合了高分子和多孔材料，如二维石墨烯、MXene 材料、分子筛、共价有机框架以及金属-有机框架等，成功地研发出一系列仿生微纳孔膜体系。通过精确地调控通道的尺寸、荷电性和浸润性，并巧妙地引入分子间相互作用和跨相传递机制，我们实现了对离子的精准可控运输。这些技术在神经信号调控、资源和能源管理，以及环境保护等多个领域展现出巨大潜力，并为后续研究和应用提供了有力的支持和参考。

**D18-05****仿生限域液体可控运输及图案化**刘欢\*<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学

**D18-06****纳米绿色印刷制造技术**宋延林\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院化学研究所

基于纳米材料制备及功能墨滴图案化的基础科学问题，通过研究纳米材料构建浸润性差异的材料表面，发展了系统的绿色印刷技术；以液滴操控纳米绿色印刷制造为研究特色，逐步形成了液滴操控印刷自组装-功能基元图案化-光电器件应用的系统研究核心竞争力。面向表面对液滴动态行为精确调控难题，开展了液滴与表界面图案化基底碰撞行为的深入系统研究。利用图案化浸润性表面实现了对液滴撞击液滴碰撞前后平动能向转动能的转化的精准调控。该过程突破了经典的牛顿碰撞定律描述范畴，首次实现了液滴碰撞前后运动方式的改变，为解决高精度图案的印刷制备和精确调控提供了新的思路。从液滴操控三维成型出发，用模板诱导液滴在三维空间内自发收缩，实现了单一或多材料的三维微纳结构的快速组装成型。进一步，利用微模板操控泡沫的演变，克服了困扰百年的气泡图案化控制难题，实现了气泡的反奥斯瓦尔德熟化和印刷气泡图案化，并以此为印刷模板组装多类功能材料。特别地，面向国际前沿的纳米光子技术，利用液滴操控纳米绿色印刷微纳制造的优势，首次发现了纳米光子结构散射-衍射转变的临界条件，并发展了光学超材料检测芯片用于新冠病毒、流感病毒、肿瘤标志物的超灵敏快速检测，为功能器件与微纳芯片的印刷制备开辟了全新的思路，构建了纳米绿色印刷技术的理论和技术体系。

**D18-07****仿生湿电效应**曲良体\*<sup>1</sup>

1. 清华大学

**D18-08****自修复导电水凝胶的组装合成**从怀萍\*<sup>1</sup>

1. 合肥工业大学

**D18-09****基于固态纳米孔道的生物分子检测**夏帆\*<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学（武汉）
2. 福州大学

**D18-010****动态二硫化学与功能材料**曲大辉\*<sup>1</sup>

1. 华东理工大学

**D18-011****Bio-inspired microrobots for biomedicine**张立\*<sup>1</sup>

1. 香港中文大学

**D18-012****无机结构的仿生柔性化合成**刘昭明\*<sup>1</sup>

1. Zhejiang University, China

无机材料因其原子密堆积结构而展示硬而脆的力学特征，相比之下高分子材料由共价键链组成而具备柔韧性。能否针对凝聚态无机固体结构开展设计，使其具有一定的柔性特征，从而拓展材料的应用价值？我们通过向生物矿化学习，发现对无机结构的化学键组成进行调配，可发现压力下无机固体结构的柔性特征<sup>[1]</sup>。通过无机离子聚合反应可进一步优化无机固体结构的合成<sup>[2,3]</sup>，通过对材料的构效关系理解，阐明了多种具有柔性力学性能的无机结构，从而改变无机材料固有的刚性特征，发展出矿物基塑料<sup>[4]</sup>、刚柔并济

材料<sup>[3,5]</sup>、弹性陶瓷塑料<sup>[6]</sup>等新材料。

[1] Z. Mu, K. Kong, K. Jiang, H. Dong, X. Xu, Z. Liu\*, R. Tang\*, Pressure-driven fusion of amorphous particles into integrated monoliths. *Science* 2021, 372, 1466-1470.

[2] Z. Liu, C. Shao, B. Jin, Z. Zhang, Y. Zhao, X. Xu, R. Tang\*. Crosslinking ionic oligomers as conformable precursors to calcium carbonate. *Nature* 2019, 574, 394-398.

[3] Y. Sang, K. Qin, R. Tang, Z. Liu\*; *Nano Research*, 2024, 17, 550-569.

[4] Y. Yu, Z. Guo, Y. Zhao, K. Kong, H. Pan, X. Xu, R. Tang\*, Z. Liu\*, A flexible and degradable hybrid mineral as a plastic substitute. *Adv. Mater.* 2022, 2107523.

[5] Y. Yu, K. Kong, R. Tang\*, Z. Liu\*, A Bioinspired Ultratough Composite Produced by Integration of Inorganic Ionic Oligomers within Polymer Networks. *ACS Nano* 2022, 16, 7926-7936.

[6] W. Fang, Z. Mu, Y. He, K. Kong, K. Jiang, R. Tang\*, Z. Liu\*, Organic-inorganic covalent-ionic molecules for elastic ceramic plastic. *Nature*, 2023, 619, 293-299.

## D18-013

### 一套探针实现现场定性和实验室定量检测

黄羽\*<sup>1</sup>, 夏帆<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)

近年来,健康保护和环境监测引起越来越多的关注,开发针对各种应用场景的生物传感器件也随之成为科学研究的热点。追求高灵敏度、高特异性、便携、低成本、现场检测、智能检测的传感器件成为一种重要趋势。其中,以适配体作为探针的传感器件是生物传感器件的重要组成部分,在医学诊断、食品安全和环境保护等不同领域具有重要的应用价值。然而,许多基于适配体的探针通常只提供单一功能,限制了它们满足多方面传感系统不同要求的能力。

受生物纳米孔道启发,我们开发的基于超级三明治 DNA 探针和浸润性分区修饰固态纳米孔道的生物传感器很好的弥补了上述缺憾。根据重要环境污染物靶标微囊藻毒素-LR (MC-LR)的适配体结构,他们设计了一种超级三明治 DNA 探针。相较于普通三明治 DNA 探针由三条 DNA 链组成,该探针能组成 3n 条 DNA 链的超级结构。因此,超级三明治 DNA 探针与靶标结合造成的信号值差异将远大于普通 DNA 探针。通过精准分区修饰,制备内表面疏水的 AAO 纳米孔道。然后,将该超级三明治 DNA 探针精准修饰于内表面疏水的 AAO 纳米孔道外表面构筑了可以精准表征和延展的生物传感器。随着靶标识别,外表面的超级三明治 DNA 探针解离,同时内表面疏水分子进一步压缩固态纳米孔道的有效孔径,两者的协同作用使得生物传感器件拥有超高的检测灵敏度 ( $2.5 \times 10^{-7} \mu\text{g/L}$ )。基于此,通过在超级三明治探针上引入荧光分子,荧光分子会随着靶标的解离分散于液相。通过便携的试纸条检测液相中荧光分子,可以实现 MC-LR 的现场初筛检测,其检测限约为  $0.01 \mu\text{g/L}$ 。同时,该器件的特异性,基质效应和真实样品的检测能力同样得到了充分的验证。

该传感器的优点在于具有超高的灵敏度、特异性,操作简便且避免使用精密贵重仪器。同时通过构建不同的超级三明治 DNA 探针,该传感器可以拓展至众多其他痕量靶标领域,如医疗诊断。此外,由于整个检测体系只涉及一次靶标识别过程,因此只引入了一次潜在的错误传播,从而降低了整个定性和定量检测过程中的总体错误风险。这种传感策略拓宽了基于适配体的复合探针的应用范围,在医学诊断、食品安全和环境保护等不同领域具有广阔的应用前景。

#### 参考文献

[1] Wei-Qi Zhang, Yi-Dan Tu, Hong Liu, Rui Liu, Xiao-Jin Zhang, Lei Jiang, Yu Huang\*, Fan Xia\*, A Single

Set of Well-Designed Aptamer Probes for Reliable On-site Qualitative and Ultra-Sensitive Quantitative Detection, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2024, e202316434 (VIP, back cover).

[2] Yu Huang, # Linxiao Liu, # Cihui Luo, Wei Liu, Xiaoding Lou, Lei Jiang, Fan Xia,\* Solid-State Nanochannels for Bio-markers Analysis, *Chem. Soc. Rev.*, 2023, 52, 6270-6293.

## D18-014

### 仿生介孔材料调控细胞增值分化

赵天聪\*<sup>1</sup>

1. 复旦大学

介孔材料因为其独特的孔道结构、高比表面积、高生物相容性等优势，在纳米医学领域有着广阔的应用前景。作为纳米药物载体时，介孔纳米材料的高药物负载率、缓释效应等特点，有助于实现高效、精准的给药。截至目前，介孔纳米材料已经在癌症等疾病模型中证明了自身优越性能，受到广泛青睐。

然而，尽管介孔材料可以高效递送药物至病灶治疗疾病，面对炎症、组织修复等慢性疾病时，单次给药策略稍显乏力，反复给药又会显著增加毒副作用。近年来，研究者开始不再局限于对杀灭病变细胞的“治标”方法，开始探索“治本”的新策略。其中，部分研究者们开始探索通过调控细胞分化趋势，从病理层面改变病灶微环境，实现对疾病的长效缓解和彻底根治。纳米材料作为一种外源、异质材料，基于独特的纳米-生物交互作用，其对细胞生理功能、分化趋势的影响也受到广泛关注。

目前，这种纳米材料干预细胞分化趋势的研究主要集中在具有各向同性形貌、单一组分和表面性质的纳米粒子。近年来，随着合成技术的飞速发展，尤其是介孔材料组装方法学的突飞猛进，一系列新型各向异性介孔材料被成功合成。考虑到生物体内，一系列受力、形状等因素对细胞、组织、器官分化代谢起到重要作用，我们猜测可以模仿生物体，构筑一系列具有仿生形貌的介孔材料，介入生理过程中，从全新的角度实现疾病病程的干预。在此，我们通过引入新型表面活性剂，严格控制自组装过程相关动力学、热力学，得以制备一系列新型仿生介孔材料，极大程度地丰富了介孔材料的范围。这些新型介孔氧化硅纳米材料在抗菌、免疫治疗等方面表现出优异的性能。

## D18-015

### 抗粘附界面材料的仿生设计及潜在应用

孟靖昕\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院理化技术研究所

自然中有许多迷人的抗粘附、润滑现象，如肾表面可以抑制结石的粘附。通过研究这些生物体独特的抗粘附行为，不但有助于深入理解其抗粘附机理，而且对设计和研发新型仿生抗粘附界面材料提供指导。基于此，我们通过引入界面阻隔层，设计了系列仿生抗粘附界面材料，改变了污染物界面接触模式，有效的抑制其界面沉积与粘附。具体如下：1) 构建仿生抗矿物粘附界面材料，抑制管道内水垢沉积利用协同仿生策略，增强了阻隔层（气、液、固）稳定性，延长涂层抗垢能力，实现了长期稳定的高效抑/除垢，有望用于火电、锅炉、管道等热交换系统；2) 构筑了仿贝壳抗油污粘附界面材料，首次实现了水下透明、高强度、防油污三种功能，为含油污水环境下实时观测提供高性能涂层材料；3) 发展了疾病的早诊新技术，将 PSA 灰区前列腺癌诊断率从 58.3% 提高到 91.7%，并搭建了检测试剂盒与自动化检测设备，成功地解决了临床 PSA 灰区难以检测的难题。

**D18-016****仿生多尺度孔道**侯旭\*<sup>1</sup>

1. 厦门大学

向自然学习是新材料和新体系发展的永恒主题，通过生物材料微纳结构和功能的研究，特别是界面仿生为设计制备复合功能材料带来全新思路。在微尺度孔道系统研究中，受肺泡启发，我们孕育了“液体门控机制”，并逐步将液体门控技术的概念与理论发展具体成形。建立应力响应液体门控膜系统，应用于恒压环境下多相流体动态膜分离的新方法；提出了偶极诱导和手性识别响应液门的新机制，建立液体门控物质检测的新理论，发展了一种无电可视化物质检测全新方法，该法操作简单并可微型化使用，可应用于不同污染物快速便携式微量检测；基于液体门控技术提出液-液界面减阻核心机理，实现了在乳化过程中有效降低液体分散时的阻力，为乳化行业提供了新的技术路线。在纳米尺度孔道系统研究中，受细胞中离子通道的启发，我们构筑了多种智能化学响应的静态和动态纳米孔道系统，开展了其在物质检测、海水淡化、类脑计算等应用方面的研究。

## 参考文献：

- [1] Joule, 7: 251-253 (2023).
- [2] Nature, 610: 74-80 (2022).
- [3] Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 119: e2206462119 (2022).
- [4] Nat. Commun., 13: 1906 (2022).
- [5] Science, 373: 628-629 (2021).
- [6] Natl. Sci. Rev., 2020, 7: 9. (2020).
- [7] Sci. Adv., 4: eaao6724 (2018).
- [8] Nat. Rev. Mater., 2: 17016 (2017).
- [9] Adv. Mater., 28:7049-7064 (2016).
- [10] Nature, 519: 70 (2015)

**D18-017****无机材料在胶原纤维内有序生长及功能探索**平航\*<sup>1</sup>, 傅正义<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学

矿化胶原纤维是骨骼的基本构造单元，羟基磷灰石在胶原纤维内部取向生长。这类特殊结构使得骨骼具有优异的力学和功能特性。胶原的结构呈纤维状、且具有周期性的条带结构，内部具有沿纤维长轴排列的限域通道。受骨骼结构形成过程的启发，我们在体外对胶原纤维内限域合成无机材料开展了系统性的研究工作，实现了一系列无机材料在胶原内的有序生长。揭示了氟化钙、碳酸锶、碳酸镉等纳米晶体在胶原纤维内的周期性有序合成与结晶，发现了限域空间内新材料结构形成动力学规律；制备了基于矿化胶原纤维的压电功能器件、忆阻器等；还发现了胶原内材料合成过程中收缩预应力生成的新奇现象，并证实了兆帕级预应力生成的普适现象。上述工作不仅对揭示骨骼形成过程有生物学借鉴意义，对多功能复合材料的合成与制备也有重要指导意义。

**D18-018****生物—非生物杂化材料的催化能量转化**苏育德\*<sup>1</sup>

1. 中国科学技术大学

Biotic-abiotic hybrid material is a new class of interdisciplinary material which couples the advantages of synthetic materials and microbial catalysts. These hybrid materials hold great promise in energy-related research fields including artificial photosynthesis, CO<sub>2</sub> reduction and microbial fuel cell. However, questions still remain in terms of the understanding and optimization of the biotic-abiotic interface. To answer these questions, we developed innovative photocatalytic and electrochemical methods, and in-situ bacteria encapsulation approach, where the biotic-abiotic interfaces are systematically optimized for different application scenarios. Using a nanowire-bacteria hybrid electrode, we realized efficient microbial CO<sub>2</sub> reduction for 7 days, with a solar-to-acetate efficiency of 3.6%. The acetate can be further converted into succinate via an integrated tandem electrochemical setup. We developed a semiconductor-cyanobacteria biohybrid system, which enables durable photocatalytic H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> evolution for at least 30 days. We also introduce the concept of wearable microbial fuel cell which employs the biofuels in human sweat for on-skin power generation.

## D18-019

### 仿生构型热学超材料

周涵\*<sup>1</sup>

1. 上海交通大学

辐射热控材料可广泛应用于建筑物降温、电子元器件散热、荒漠治理等。提供基于生物光子结构设计仿生热控散热材料的新思路和新方法。发现极端耐热生物巨瘤角天牛、大白花金龟、尖翅银灰蝶等辐射冷却新奇现象及其热光子构型的宽频散热增益特性。构筑仿生微结构聚偏四氟乙烯 PVDF/SiO<sub>2</sub> 辐射冷却薄膜，由纳米孔、微米网格、微米球以无序形式排列。采用紫外光刻和纳米压印结合的方法构筑仿生微结构 PDMS/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 辐射冷却复合薄膜，由半椭圆柱有序阵列和微纳球无序结构组合而成。基于全内反射效应可增强反射率，基于折射率递减协同可增强发射率。创制的仿生微结构聚偏四氟乙烯 PVDF/SiO<sub>2</sub> 辐射冷却薄膜具有强日光反射、高红外辐射、低角度依赖性等特点，对太阳光波段(0.25-2.5μm)能量的反射高达 92%，在大气窗口的平均发射率高达 0.95，可在 1000 W/m<sup>2</sup> 的太阳光照下实现最高 6 °C 的降温，辐射降温功率达到 61 W/m<sup>2</sup>，且薄膜兼具柔性与强度。

发现涡蛱蝶蓝绿色鳞片基于非对称多层脊的镜面反射相位差所致的反射分光效应，构建基于锆/铝掺杂氧化锌 AZO/铝的二维孔仿生序构复合超表面，提出收敛速度快、预测精度高、可靠性强的结构-性能映射神经网络逆向设计方法，实现近红外镜面低反射-中红外高发射双波段光谱的快速反向预测，算法模型数 ≥900，单组参数逆向设计和性能预测时间 ≤700 ms，多目标综合优化时间 ≤10 min，解决热辐射多目标光学响应的快速优化及高通量设计难题。创制的散射型仿生陶瓷基复合超表面具有 1.06 μm 处镜面反射率 ≤1%，5-8 μm 红外最高发射率 ≥94%，半高宽 ≥1.8 μm，实现高于 50 °C 的辐射降温。

## D18-020

### 仿生褶皱及其生物学应用探索

侯鸿浩\*<sup>1</sup>

1. 南方医科大学

作为自然界生物体和各种软材料表界面最普遍的微结构，由应力失稳产生的褶皱图案因其可自发形成、简单快捷、刺激响应性、易于大面积制备和多功能化等诸多特点受到了广泛的关注，在微纳制造、智能表面和器件、组织工程支架和界面工程等方面显示出独特的应用优势。近年来，本团队发展了通过自褶皱技

术仿生构筑动态微结构化表界面的新方法，实现对材料表面微结构和性能的动态调控；并对褶皱微结构化表界面在生物医学方面的应用进行了系列探索。利用动态褶皱微结构的可调性质，实现了对表面细胞和细菌等的可控调节，发展了基于近红外光响应褶皱表面无损获取细胞膜片新方法；针对工程化肌组织缺乏实时检测技术和有效功能重建的挑战，开发了一种基于仿生褶皱微结构与纳米粘土片层互锁增强自适应的离子导电水凝胶柔性应变传感器，开拓了基于表界面力电耦合与机体交互传感作用的原位实时检测生物电子学新方法，实现对心肌梗死的准确定位和精确检测；构建了传感检测与原位修复于一体的仿生各向异性微结构化力电耦合功能支架体系。上述工作有望为仿生功能化表界面和智能生物医用器件的设计与构建提供新思路。

#### 参考文献

[1] Honghao Hou\*, et al, Biomimetic natural biomaterials for tissue engineering and regenerative medicine: new biosynthesis, recent advance, and emerging applications, *Military Medical Research*, 2023, 10:16.

[2] Honghao Hou\*, et al, A smart adhesive Janus hydrogel for non-invasive cardiac repair and tissue adhesion prevention, *Nature Communications*, 2022, 13, 7666.

[3] Honghao Hou\*, et al, Highly stretchable and biocompatible wrinkled nanoclay-composite hydrogel with enhanced sensing capability for precise detection of myocardial infarction, *Advanced Materials*, 2023, 35, 202209497.

[4] Honghao Hou\*, et al, Cardiac-adaptive conductive hydrogel patch enabling construction of mechanical-electrical anisotropic microenvironment for heart repair, *Research*, 2023, 0161.

[5] Honghao Hou\*, et al, Smart Surface-Based Cell Sheet Engineering for Regenerative Medicine, *Trends in Chemistry*, 2023, 5, 88.

[6] Honghao Hou#, Hu, Kaiming#, Lin, Hongbo; Forth, Joe; Zhang, Wenming\*, Russell, Thomas P\*, Yin, Jie, Jiang, Xuesong\*. Reversible Surface Patterning by Dynamic Crosslink Gradients: Controlling Buckling in 2D. *Advanced Materials*, 2018, 30, 1803463.

[7] Honghao Hou, Jie Yin, Xuesong Jiang\*. Reversible Diels–Alder reaction to control wrinkle patterns: from dynamic chemistry to dynamic patterns. *Advanced Materials*, 2016, 28, 9126.

[8] Honghao Hou, Jie Yin, Xuesong Jiang\*, Smart patterned surface with dynamic wrinkles, *Accounts of Chemical Research*, 2019, 52, 1025.

## D18-021

### 复合材料仿生/超生微结构设计及力学表征

原亚南\*<sup>1</sup>

1. 武汉大学

在复合材料微结构设计方面，大自然给我们提供了很好的范本。无论是珍珠母、海螺还是甲壳类生物均通过合理的微结构设计，突破了“强度和韧性，此消彼长”的限制，这为纤维增强树脂基复合材料的力学微结构设计提供了参考范本。另一方面，随着预浸料制备技术的逐渐发展，单层碳纤维面密度可实现低至20g，这为复合材料提供了极大设计空间。此外，其优异的分层损伤抑制特性为复合材料的力学性能提升提供了新的可能。本报告创新性的将仿生与超薄铺层相结合，探索了两者结合的多种可能方案。此外，我们将多种仿生微结构继续混合设计并提出了超生设计策略，强度和韧性均有大幅度提升。综合来看薄层化为仿生化提供了制备技术，仿生化为薄层化提供了设计灵感。两者紧密相连，相辅相成，为高性能复合材料的仿生设计提供了新的途径。

**D18-022****Ice mediated reaction and assembly for the synthesis of high-entropy alloy materials**贺志远\*<sup>1</sup>

1. 北京理工大学

**D18-023****铁钼氧化物修饰聚多巴胺近红外二区的光热杀菌研究**谢益骏\*<sup>1</sup>, 常庆<sup>1</sup>, 邓小勇<sup>1</sup>, 方思琪<sup>1</sup>

1. 上海大学

聚多巴胺具有较强的光热性能和生物相容性, 在生物医学领域有很广泛的应用。然而, 其近红外二区的光热抗菌功能却鲜有报道。在这项工作中, 我们引入了铁钼氧化物修饰的聚多巴胺作为一个高校的杀菌剂, 它具有较强的近红外二区的吸收, 可以有效产生自由基和消耗谷胱甘肽, 从而实现一个光热/光动力杀菌治疗的协同作用。聚乙烯亚胺作为中间层可以通过静电吸附作用绑定聚多巴胺和铁钼氧化物。与纯的聚多巴胺材料相比, 铁钼氧化物修饰的聚多巴胺的光热转化效率有高达 145% 的提升。这是由于在近红外二区激光照射下, 电子在聚多巴胺和铁钼氧化物之间形成了流动, 从而使 HOMO 和 LUMO 能级差变小。合成得到的聚多巴胺复合材料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均有非常好的杀菌效果。该工作为提升黑色素材料的光热性能和开发新型碳材料抗菌剂提供了新思路和新方法。

**D18-024****仿生设计在高强韧金属结构材料研制中的应用**刘增乾\*<sup>1</sup>, 张哲峰<sup>1</sup>

1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, China

金属结构材料是现代科技发展的重要物质基础, 然而其强度、断裂韧性、阻尼、电导等不同性能之间存在严重的相互制约关系, 基于成分和组织调控的传统方法难以突破这一瓶颈, 亟需探索协同强韧化新方法。自然界中的生物材料经亿万年的竞争与选择, 进化出巧妙的结构而表现出优异的强韧性能, 可为金属材料强韧化设计提供重要启示。本报告针对装甲与空间防护等重大需求, 通过模仿生物材料空间取向结构, 以生物力学效应指导结构设计, 研制出高强韧高阻尼镁基仿生复合材料, 实现了强度、阻尼与吸能效率的更优匹配, 且兼具优异的断裂韧性与形状记忆功能, 进而发展出仿生金属材料力学模型, 建立了仿生结构与力学性能之间定量关系, 并以此指导仿生结构优化设计, 进一步实现了材料协同强韧化。在此基础上, 将相关仿生设计思路与制备策略扩展应用于其他金属体系, 研制出轻质高强高阻尼镁-MAX 相仿生金属陶瓷、高弹高强高导银-镍钛仿生材料、高强韧高耐磨银基电接触材料等一系列新型高性能仿生金属材料, 克服了强度、韧性、阻尼、电导等不同性能之间的制约关系, 突破了现有材料性能的诸多极限。

**D18-025****仿生超浸润油水分离膜材料**李健\*<sup>1</sup>

1. 西北师范大学

**D18-026****柔性光/电学材料-运动监测与分析**

李风煜\*<sup>1</sup>

1. 暨南大学

**D18-027****仿生动态纳米通道材料**王苗\*<sup>1</sup>

1. 厦门大学

**D18-28****仿生复合材料的动态性能主动设计理论与调控方法**

韦小丁\*

Peking University, China

具有优异冲击能量吸收特性的复合材料在空间飞行器安全、战场人员和装备防护、以及高速交通运输领域具有举足轻重的地位。区别于准静态工况，复合材料结构的瞬态响应与冲击载荷的能量频谱（冲击响应谱）密切相关。一直以来，复合材料的冲击性能研究主要依赖昂贵的试验和大型模拟。我们将经典的剪滞模型推广到动态领域，提出“动态剪滞模型”，揭示了复合材料中冲击能量在微结构尺度的传递特征，建立了复合材料“材料组分-微观结构-吸能特性”的定量关系。在此基础上，我们推导了预测复材结构冲击弹道极限速度的多尺度理论模型，解释了英国皇家科学院 Norman Fleck 院士课题组和代尔夫特材料中心的主任 S. van der Zwaag 教授课题组分别在实验中观察到的复合材料冲击极限对基体机械性能的依赖关系。相关工作作为建立先进仿生复合材料的冲击吸能特性与微结构之间的动态构效关系提供了新的思路和理论基础。

**D18-29****仿生离子皮肤的力学强化研究**

孙胜童\*

东华大学

用于智能感知的仿生离子皮肤需要具备良好的柔性和适应性，但低模量设计往往带来较差的力学耐受性。如何从凝聚态结构水平上设计合成刺激作用下力学强化的离子皮肤是提高其力学耐受性的关键难题。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，使离子皮肤在刺激作用下实现相分离结构的可控解离及重组，强化了其耐受拉伸断裂、疲劳破坏、冲击震荡、热致软化、界面剥离等多种场景下的服役性能。例如，近期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自顺服离子皮肤，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。得益于这一自顺服特性，该离子皮肤可用于动态场景下的高保真皮肤生理信号监测。

**D18-30****仿天然骨结构仿生材料的设计与性能研究**

张永刚\*

大连理工大学

引言：天然骨组织主要由胶原蛋白和羟基磷灰石（HA）组成，具有从纳米到宏观尺度的高度组织化的复杂层次结构。由于其有机/无机复合组成，超精细的结构设计，骨组织具有非常优异的力学性能。在此，受天然骨的组成和微观结构的启发，我们利用 3D 打印技术开发了一种由高度定向排列的一维羟基磷灰石（1D HA）和聚乳酸组成的高强度仿生复合支架材料。

材料与amp;方法：首先，通过水热反应合成掺杂 Sr 元素的 1D HA 与掺杂 Cu 元素的 1D HA。将一定量的掺杂 Sr 和 Cu 的 1D HA 与聚乳酸在丙酮中混合均匀，然后干燥。利用挤出式 3D 打印机（Bioplotter，日本）打印出具有所需尺寸与形状的仿生 1D HA/聚乳酸复合支架。

结果与amp;讨论：在仿生 1D HA/聚乳酸复合支架中，Sr/Cu 掺杂的 1D HA 均匀分布在聚乳酸基质内，并沿其晶体 c 轴高度定向排列，类似于天然骨骼中 HA 纳米晶体的排列方式。高度定向排列的 1D HA 晶体显著增强了聚乳酸基质的机械性能，包括压缩和拉伸强度、模量、断裂韧性、抗溶胀性和长期结构稳定性。在生物学上，这一仿生复合材料具有良好的体外矿化能力，并支持 hMSC 的附着、增殖，能够促进 hMSC 对碱性磷酸酶的表达。此外，高度定向排列的 Sr/Cu 掺杂的 1D HA 晶体诱导了 hMSC 的取向排列和各向异性胶原纤维基质的分泌。

结论：有机/无机复合材料的微观结构对其机械性能与生物学性能具有重要影响。这里应用的仿生设计原则可能为开发用于骨再生的先进复合材料提供灵感。

参考文献：

[1] Yonggang Zhang, Jiaping Li, Vivian Hilda Maria Mouser, Lorenzo Moroni, Pamela Habibovic\*. Biomimetic mechanically strong one-dimensional hydroxyapatite/poly(D,L lactide) composite inducing formation of anisotropic collagen matrix. ACS Nano. 2021, 15, 17480.

[2] Zhang, Y., et al., Bioinspired Ultralight Inorganic Aerogel for Highly Efficient Air Filtration and Oil-Water Separation. ACS Applied Materials & Interfaces 2018, 10 (15), 13019.

## D18-31

### 多肽的手性自组装及其在外伤修复中的应用

周云龙\*

国科温州研究院

手性是自然界一种重要的属性，手性在生命功能体系维持、医药设计等方面都发挥着重要作用。有序的手性结构生成包含了多尺度下手性基元之间复杂的各项异性的强、弱相互作用。手性基元可以是手性小分子、大分子、无机物等复杂体系，这些复杂体系的手性多级次特征及生物活性复杂，值得探讨。基于此，课题组近年来开始了基于具有生物活性功能的自组装多肽体系的构建、组装机理分析、生物活性功能挖掘。重点工作包括（1）通过化学结构设计手性组装体，研究了其在外伤感染中的智能性抗菌效果及手性依赖的炎症调控功能；（2）设计了系列糖肽序列，研究了其超小结构下的结构调控及机制研究；（3）结合人工智能手段与分子生物机制挖掘，设计了具有系列具有神经修复功能的手性多肽自组装体。

[1] Chen, L.M; & Zhou,\* Y. L. et al. Sequence isomerism-dependent self-assembly of glycopeptide mimetics with switchable antibiofilm properties. Chemical Science 2019,10, 8171-8178.

[2] Yunlong Zhou\* et al., Enantiomer-dependent supramolecular immunosuppressive modulation for tissue reconstruction, ACS Nano,2024, doi.org/10.1021/acsnano.3c11601. [3] Yunlong Zhou\* et al., Diverse effects of chiral peptide self-assembled supramolecular hydrogels in repair and immunity of nervous system. Unpublished results.

## D18-32

### 自适应神经界面材料与器件

杜学敏\*

中国科学院深圳先进技术研究院

神经接口技术因对失明、耳聋、帕金森、抑郁症等神经系统疾病治疗效果显著而备受关注，但仍面临神经接口核心器件与组织间的界面适配挑战：一方面，由于这类器件往往是二维平面结构，无法在形态上匹配复杂三维组织而影响器件与组织间有效信息交互；另一方面，由于这类器件的表界面细胞亲和性差，会诱发炎症反应导致器件被纤维化组织包裹而丧失信息传递功能。鉴于此，我们提出将刺激形变高分子材料与植入式神经电极复合实现功能化，通过功能电极宏观形状调控，实现电极与生物组织间形态匹配方法；进一步，我们通过功能电极表面微观形貌调控，实现电极与生物组织间良好相容性策略；最后，我们验证新型光电功能电极在神经调控方面的作用。并基于以上研究，探索自适应神经接口器件在神经疾病治疗方面的潜在应用。

**D18-33****具有优异力学性能水凝胶的仿生设计与制造**

梁翔禹\*

中国农业科学院深圳农业基因组研究所

自然界中的生物材料常常使用有限的成分进行构筑，其可通过利用多尺度的结构设计，使其与人工材料相比，具有无与伦比的机械性能。相比之下，合成材料的设计主要集中在开发新的化合物，而不能复制大自然生物材料的优异特性，如抗疲劳和抗冲击性能。我们报道一种简单而通用的策略，利用冷冻铸造和自组装等工艺，实现水凝胶内部多尺度多取向结构的构建，不仅提高其疲劳阈值和冲击能吸收值达数个数量级以上，同时不牺牲其高水含量。该策略可被广泛应用于各种水凝胶材料，包括多糖（藻酸盐、纤维素、几丁质）、蛋白质（明胶）、合成聚合物（聚乙烯醇）以及相应的聚合物复合材料。本工作中所报道的仿生水凝胶，相对于传统方法获得的水凝胶材料具有优异的抗疲劳和抗冲击特性，同时兼具成本低、性能高、耐用等优点，有望应用于软体机器人、医疗器械和可拉伸柔性电子皮肤等领域。

**D18-34****蔡司显微镜关联解决方案在仿生科学和材料研究中的应用**

温子丰\*

卡尔蔡司（上海）管理有限公司

大自然是人类无声的导师，了解自然界中材料的组成、结构、性质及变化，探索结构与功能的本质关系，并最终利用获取的系统设计原理设计和制造新材料和新器件，是人类向自然学习的三个阶段。本报告将为您介绍蔡司研究显微镜从宏观到微观的跨尺度关联表征方案以及在冷冻传输、原位力学显微表征技术上的最新进展，帮助您在仿生材料研发的各个阶段进行可视化、高精度、可定量的综合性显微分析，建立从结构到性能到应用的“信息通道”。

**D18-35****生物典型液固界面及仿生功能表面拓展探索**

刘燕\*

吉林大学

机械表/界面的物理和化学现象具有特殊性和复杂性，对机械产品的功能和性能都有重要的影响，面对机械表面界功能化、多样化、智能化的发展需求，基于仿生理念的表面设计，成为高性能特殊功能表面的

趋势。天然生物体表具有优异的功能，疏水、自洁、集水、变色、变形等，基于天然生物体表特征，进行仿生功能表面的设计，继而探索其在海洋腐蚀、力学传感、药物检测等领域的应用。

## D18-36

### 仿生表面流体高效输运研究

刘亚华\*

大连理工大学

流体高效操控在微流体、传热和防结冰等各种应用中具有广泛的应用前景。其中一个核心问题是液滴在垂直方向上的快速脱离和在横向上的快速输运。本报告将简要介绍我们最近在这一问题上所做的努力和取得的进展。对于液滴垂直撞击表面，我们探索了新的弹跳机制，以减少撞击液滴与固体表面的接触时间。对于液滴的横向运动，我们设计了多种表面，通过调控表面结构和引入外场，实现了表面液滴的高效可控输运<sup>[1-5]</sup>。

参考文献：

[1] Zichao Yuan, Chenguang Lu, Cong Liu, Xiangge Bai, Lei Zhao, Shile Feng, Yahua Liu\*. Ultrasonic tweezer for multifunctional droplet manipulation, *Science Advances*, 2023, 9(16): eadg2352.

[2] Cong Liu, Chenguang Lu, Zichao Yuan, Cunjing Lv\*, Yahua Liu\*. Steerable drops on heated concentric microgroove arrays, *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3141.

[3] Haiyang Zhan, Chenguang Lu, Cong Liu, Zuankai Wang, Cunjing Lv\*, Yahua Liu\*. Horizontal motion of a superhydrophobic substrate affects the drop bouncing dynamics, *Physical Review Letters*, 2021, 126(23): 234503.

[4] Yahua Liu#, Matthew Andrew#, Jing Li, Julia M Yeomans\*, Zuankai Wang\*. Symmetry breaking in drop bouncing on curved surfaces, *Nature Communications*, 2015, 6: 10034.

[5] Yahua Liu#, Lisa Moevius #, Xinpeng Xu, Tiezheng Qian, Julia M Yeomans\*, Zuankai Wang\*. Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces, *Nature Physics*, 2014, 10(7): 515-519.

## D18-37

### 仿肌腱强韧水凝胶的制备和应用

吴书旺\*

苏州大学

水凝胶在组织工程、软机器人、植入式电子产品、药物输送以及储能装置等诸多领域具有广泛的应用。通常需要对水凝胶的机械性能进行精细的调整以满足特定的需求，例如，软体机器人需要强韧的水凝胶；在细胞培养中，水凝胶的弹性模量应与细胞的弹性模量相匹配；神经探针需要力学性能原位可调的材料。研究人员一直致力于提出简单方法制备满足不同力学需求的水凝胶。同时，一个多世纪前 Franz Hofmeister 发现不同离子对蛋白质的沉淀有着显著的特异性影响。该现象表明，高分子沉淀过程中，高分子链之间的相互作用可被不同离子调控，基于此，提出了一种通过 Hofmeister 效应调节聚合物链的聚集状态来广泛地改变水凝胶机械性能的策略。通过该方法制备的水凝胶具有较大的力学性能窗口：拉伸强度从  $50 \pm 9$  kPa 到  $15 \pm 1$  MPa，韧性从  $0.0167 \pm 0.0003$  到  $150 \pm 20$  MJ m<sup>-3</sup>，伸长率从  $300 \pm 100\%$  至  $2100 \pm 300\%$ ，模量从  $24 \pm 2$  至  $2500 \pm 140$  kPa。进一步，结合定向冷冻和盐析效应制备了多级结构的仿生水凝胶，具有和跟腱相媲美的复杂程度，具有高强度、韧性、拉伸性和抗疲劳性的优异力学性能。其中，该仿生水凝胶的韧性不仅优于先前报道的大多数水凝胶，还优于聚二甲基硅氧烷、合成橡胶和天然蜘蛛丝。此外，该方法具有普适性，可应用于不同其他高分子。在此基础上，探究了所制备系列水凝胶在椎间盘和跟腱修复方面的应用，

结果表明，所制备水凝胶可减轻炎症发生，缩短椎间盘和跟腱的修复时间。

## D18-38

### 酚醛树脂基轻质多孔仿生纳米复合材料

于志龙<sup>1</sup>, 俞书宏<sup>2\*</sup>

1. 西北工业大学
2. 中国科学技术大学

生物材料能够以最少的物质实现最优异的性能，这源于其自分子尺度至宏观尺度的复杂多级结构，生物材料启发的高性能仿生纳米复合材料的制备必须突破跨尺度多级结构的高效设计与可控制备的难题。通过在酚醛聚合的过程中结合纳米技术和材料，可以进一步发挥酚醛树脂的本征优势，获得新型的高性能多功能仿生纳米复合材料：发展了酚醛限域聚合、原位聚合辅助纳米基元组装等策略，在分子、纳米和微米尺度上分别设计和构筑多级次结构，成功开发了多种酚醛气凝胶、碳气凝胶和仿生人工木材，在隔热防火、耐烧蚀、应力传感器等领域表现出了优异的性能。此外，液态的酚类小分子（如甲酚）可以用作溶剂实现对纳米碳材料（比如碳纳米管）的直接高浓度稳定分散，结合酚醛的原位聚合过程，制备高分散的 CNTs/酚醛复合材料，实现高电导率和增强增韧效果。

## D18-39

### 水凝胶极端力学的仿生设计

刘吉\*

南方科技大学

水凝胶网络具有与人体组织在结构、组成和生理学上的相似性，已经广泛应用于生物医学工程等领域。传统合成水凝胶强度低，易发生脆性断裂，很大程度上限制了它们的应用。与之相反，生物组织(如肌肉)却有着优异的韧性、强度和自修复等特性。水凝胶的增韧可以通过引入各类耗散机制(如动态主客体作用)来实现，而疲劳裂纹的扩展只需断裂一层高分子链，并不受额外能量耗散机制的影响。受启发于生物组织的构效关系，我们提出抗疲劳水凝胶的设计理念：让疲劳裂纹在扩展中遇到比破坏一层高分子链强韧得多的组分，比如纳米晶域或有序微纳结构等。通过在水凝胶内部等级结构的调控，我们开创性的实现极端力学行为的水凝胶设计与制造，为生物电子、组织工程和软体机器人等领域面临的软材料力学相关问题提供有效解决策略。

## D18-40

### 驱磁细菌启迪的矿化及应用

丁春梅\*, 李建树

四川大学

铁的氧化物、氢氧化物是一类天然的铁氧基矿物，具有丰富多样的晶型，已被广泛应用于海水淡化、除冰、驱动以及生物医学领域。然而，铁氧矿物的光热活性并不理想，因此，迫切需要高效的光热转换以减少能耗和有害的副作用。尽管传统的水热及共沉淀法可以通过控制形貌与尺寸来调节矿物的光热活性，但是这些方法依赖于高温高压或外部模板，条件苛刻。

在自然界中，许多重要的结晶过程，比如生物矿化，都是发生在极小体积的受限空间中。尺度在原子到数百微米范围的受限体系存在独特的晶体成核和生长行为，可以通过改变热力学和动力学过程来稳定亚稳态中间体，从而调控表界面晶体的形貌或取向。受此启示，本文通过构建表面受限体系，实现了铁氧矿物层的可控矿化和多级组装，通过增强光在层次化结构中的反射和吸收，实现了光热性能的极大提升，并利用高效光热矿化层进行了多功能应用的验证，具体而言：（1）开发了磁场辅助液膜矿化法，构建了高光热转换效率的铁氧矿物涂层，实现除冰/霜及抗菌；（2）基于该方法进一步制备了氧化铁-硫化铋复合矿物，打造了浮水自洁机器人。

## D18-41

### Bio-inspired self-assembly of polyelectrolyte complexes

赵强\*

华中科技大学化学与化工学院

Polyelectrolyte self-assembly in biological systems features delicate control over the assembly kinetics and materials microstructures affording hierarchical structures and smart responsiveness. However, little to nothing is known about how coacervates evolve into intricate solid microarchitectures. In this work we introduce a paradigm shift inspired by sandcastle worm cement that enables both a triggered complexation of polyelectrolytes, and formation of hierarchical pores and gradient structures that are crucial for smart sensors, responsive actuators and wet adhesives. An aqueous mixture solution containing poly(ethyleneimine) and poly(sodium 4-styrenesulfonate) spreads efficiently on acidic water, leading to the formation of hierarchically porous membranes. The reduced surface tension of the polyelectrolyte mixture solution drives the surface spreading, while the interfacial polyelectrolytes complexation triggered by the low pH of water mitigates water-in-water mixing. The synergy of surface tension and pH-dependent complexation represents a generic mechanism governing interfaces between miscible solvents for materials engineering, without the need for surfactants or sophisticated equipment.

## D18-42

### 二维材料的仿生褶皱及其应用

楚增勇\*

国防科技大学

## D18-43

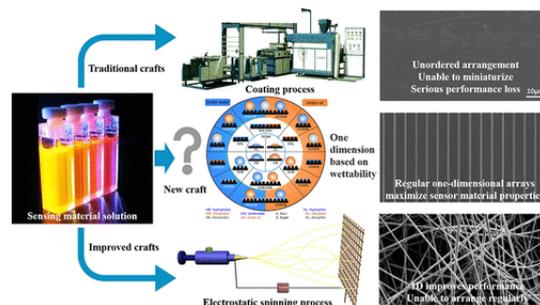
### 基于界面浸润性原理的仿生一维传感器件制备

姜翔宇\*

北京航空航天大学

伴随着工业生产的快速发展，传感器大量的被应用，现代科技对精准检测和实时监控需求的不断提升，传感器的研发与应用显得愈发关键。要进一步提升传感器的灵敏度、响应速度、小型化程度以及可集成程度，就需要对传感材料进行微观图案化，目前的材料图案化方法均存在诸多问题，例如成本高昂、加工精度低、结构无序等。为解决以上痛点，本课题组开发了一种基于浸润性原理的液桥诱导自组装技术，在过去的工作中成功研制出一系列创新性微米线阵列传感器，包括有机蒸汽传感器、磁场传感器以及阵列式光

电器件。其中，基于浸润性原理图案化的 AIE 分子微米线阵列传感器具有极大的比表面积，表现出卓越的稳定性和灵敏度，能针对性地对各类有机蒸汽进行高效识别和快速响应。这一突破性工作不仅丰富了聚集诱导发光材料在传感应用领域的理论基础，而且为高性能、多功能化学传感系统的构建提供了全新的技术和方法，充分体现了本课题组在分析与传感功能材料传感器领域的深厚造诣与前瞻视野。



**Fig. 1 One-dimensional arrays of sensing materials based on wettability interface dewetting process.**

关键词：浸润性；传感器；阵列化

参考文献

- [1] Jiang, X; Gao, H; Zhang, X; et al. *Nat. Commun.*, **2018**, **9**: 3799.
- [2] Jiang, X; Feng, J; Huang, L; et al. *Adv. Mater.*, **2016**, **28(32)**: 6952-6958.
- [3] Jiang, X; Wu, Y; Su, B; et al. *Small*, **2014**, **10(2)**: 258-264.
- [4] ZHAO Z, MA C, XU L, et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, **15(32)**: 38938-38945.
- [5] Wang, Z; Jiang, X; Huang, K; et al. *Adv. Mater.*, **2021**, **33(51)**: 2106067.
- [6] Jiang, X; Yu, Z; Ma, C; et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, **13(10)**: 12501-12508.
- [7] Jiang, X; Zhang, P; Zhang, J; et al. *Nanoscale Res. Lett.*, **2018**, **13**: 53.

## D18-44

### 抗病毒细胞膜仿生纳米诱饵

饶浪\*

深圳湾实验室

由新型冠状病毒(SARS-CoV-2)引起的新冠肺炎大流行(COVID-19)对全球经济和人们的日常生活造成了巨大影响。在临床上，大多数新冠肺炎患者表现出可忽略或轻微的症状，但其中约 20% 的患者会因感染诱发的细胞因子释放综合征（或“细胞因子风暴”）而发展成重症肺炎、多器官功能衰竭甚至感染性休克。针对炎症性细胞因子的中和抗体有潜力抑制新冠肺炎引起的免疫病理，但细胞因子相互作用的复杂性和细胞因子靶点的多样性使得减弱细胞因子风暴充满挑战。此外，生物体内非特异性分布和剂量限制副作用限制了这些游离抗体的进一步应用。生物材料和纳米技术的最新进展为传染性和炎症性疾病提供了诸多新机遇。在这里，我们首先讨论新冠肺炎细胞因子风暴的潜在机制，然后回顾相关的治疗策略和正在进行的临床试验。此外，我们总结了近期用于改善基于抗体和广谱细胞因子中和策略的新兴生物材料的研究。我们期望本次汇报能为新冠肺炎细胞因子风暴和其他炎症性疾病的新型疗法的开发提供新的思考。

关键词：新型冠状病毒；细胞因子风暴；仿生生物材料。

参考文献：

- [1] Q.-F. Meng, R. Tian, H. Long, X. Wu, J. Lai, O. Zharkova, J.-W. Wang, X. Chen, L. Rao, *Adv. Mater.* 2021, **33**, 2100012.
- [2] L. Rao, L. Wu, Z. Liu, R. Tian, G. Yu, Z. Zhou, K. Yang, H.-G. Xiong, A. Zhang, G.-T. Yu, W. Sun, H. Xu, J. Guo, A. Li, H. Chen, Z.-J. Sun, Y.-X. Fu, X. Chen, *Nat. Commun.* 2020, **11**, 4909.

- [3] L. Rao, S. Xia, W. Xu, R. Tian, G. Yu, C. Gu, P. Pan, Q.-F. Meng, X. Cai, D. Qu, L. Lu, Y. Xie, S. Jiang, X. Chen, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2020, 117, 27141.
- [4] L. Rao, L.-L. Bu, L. Ma, W. Wang, H. Liu, D. Wan, J.-F. Liu, A. Li, S.-S. Guo, L. Zhang, W.-F. Zhang, X.-Z. Zhao, Z.-J. Sun, W. Liu, Angew. Chem. Int. Ed. 2018, 57, 986.
- [5] L. Rao, L.-L. Bu, B. Cai, J.-H. Xu, A. Li, W.-F. Zhang, Z.-J. Sun, S.-S. Guo, W. Liu, T.-H. Wang, X.-Z. Zhao, Adv. Mater. 2016, 28, 3460.

#### D18-45

##### 仿生多机制协同海洋防污涂层的构筑与应用性能

张庆华\*, 佟哲名, 高峰

浙江大学

生物污损给人类海事活动带来诸多不利影响。防污涂层是解决海洋生物污损最有效、最可行的手段之一。基于对海洋动物的防御行为与防护机理的研究, 我们提出了仿生多机制协同防污理念, 通过在低表面能有机氟/硅聚合物中引入一系列智能响应单体(环糊精、偶氮苯、丁香酚、香豆素、聚乙烯吡咯烷酮等), 制备了一系列智能响应仿生海洋防污涂层。包括基于香豆素的紫外二聚和解二聚化机理制备天然防污剂可控释放和润滑剂可控锁联的超浸润防污涂层, 基于光响应 pH 阶跃剂制备了高效防污剂可控释放的超润滑仿生防污涂层。通过实验室测试、海洋挂板与实海应用试验系统评价了各种仿生防污涂层的防污性能。进一步开展了仿生海洋防污涂层的产业化放大技术研究, 突破仿生超浸润防护涂层在工程化应用过程中存在的规模化制备、表界结构与力学性能强化、应用耐久性等关键问题, 所研制的涂层满足了海洋工程装备的环保型长效静态与动态防污需求。

#### D18-46

##### 仿生纳米生物界面的设计与调控

刘立志\*

西北工业大学

纳米生物界面的精确调控是生物转化医学领域的热点研究内容, 也是探究生物分子与纳米材料作用机制的核心手段。报告人将围绕耐药细菌感染和肿瘤两大疾病的诊断和治疗手段, 针对血液细菌捕获效率低、多重耐药菌难以杀灭、纳米材料易被机体识别清除而肿瘤靶向能力差等关键科学问题, 汇报近年来以仿生设计为手段构筑多个纳米生物功能界面系统解决上述难题的研究进展。具体主要包含三个方面内容: 1. 机械性能可控型仿生血液透析器的设计与应用; 2. 细菌膜硬度介导抗菌仿生纳米线的开发以及作用机制; 3. 仿生纳米粒子细胞膜涂层的包裹机制、涂层修复技术以及肿瘤靶向应用。

#### D18-47

##### 基于三维微结构构筑的仿生电子皮肤

张一慧\*

清华大学

人类皮肤对机械刺激的感知源于体内的机械感受器, 这些感受器可将外力转化为电信号, 并通过中枢系统传输到大脑。模仿这些机械感受器的空间分布形式, 使其能够独立感知压力、剪切力和应变, 可有效

促进电子皮肤领域的发展，但相关工作鲜有报道。本报告将介绍一种具有三维架构的电子皮肤（简称“3DAE-Skin”），其亮点在于力和应变传感器的空间布局，这一布局模仿了人类皮肤中的 Merkel 细胞和 Ruffini 小体的空间分布，使 3DAE-Skin 具备了出色的解耦测量能力，能够同时解耦测量压力、剪切力和应变。将该电子皮肤器件与信号处理模块、深度学习算法相结合，开发出具有与人类皮肤感知空间分辨率相当的人工触觉系统，该系统通过简单的触摸操作即可同时测量物体局部的弹性模量和主曲率。为展示该触觉系统的实际应用价值，我们利用该系统测量了具有不同形状的水果、面包等食物的新鲜度随时间的变化。该应用不仅验证了 3DAE-Skin 的优异性能，也展示了其在人机交互、智能假肢等领域中的广阔应用前景。

## D18-48

### 仿生离子通道类突触材料

侯雅琦\*

厦门大学

人脑以极强的可塑性、通用性、自适应性、自组织性以及节能高效等，为人工智能技术的发展提供了启发和示范，由此诞生类脑智能这一新兴学科。人脑中数以百亿个神经元之间通过突触相连，以离子为信号载体，通过神经元细胞上具有忆阻特性的离子通道完成离子可控传输改变突触的可塑性，实现信息传递、及高效复杂的计算。受此启发，开发具有忆阻效应和类突触性质的纳米通道离子忆阻新材料将成为推动当今类脑智能等前沿技术发展的基石。纳米通道材料具有高效的离子传输特性，可作为结构和功能材料单元。基于玻璃单纳米通道开发的单孔离子通道逻辑忆阻器，具有化学信号调制的逻辑功能，可以作为构建人工离子通道神经网络的基础组件。通过控制单孔内表面修饰官能团的质子化和去质子化过程，可以改变官能团携带的电荷量与电荷密度，从而改变纳米孔表面与传输离子的相互作用，进而调控纳米孔离子电导，实现忆阻。此外，单孔离子通道忆阻器表现出多种突触功能，包括双脉冲促进（PPF）、双脉冲抑制（PPD）、脉冲频率依赖可塑性（SRDP）等。同时，单孔离子通道忆阻器具有可设计连接组合的灵活性。这种化学信号调制的动态人工突触功能与逻辑功能，再结合单孔纳米通道可灵活连接的特性，为仿生离子通道类突触材料在构建动态人工离子通道神经网络以及实现类脑计算方面迈出了重要一步。

## D18-49

### 仿生结构化润湿表面的设计及检测应用研究

李淑一，廖晨晨，杨超环，杜成玉，范玉艳，刘燕\*

吉林大学

基于典型生物表面的特殊润湿性能，系统探究了多组分材料与多尺度微观结构的协同作用、不同液滴的定向润湿铺展行为规律以及在输运过程中形态与速率的变化等问题，实现表面液滴运动轨迹的高效、定量操控，以实现简便、快速、准确、经济的溶液可视化检测。基于前期仿生液固表/界面研究及相应的界面检测基础，针对汗液检测过程中面临的新旧汗液混合及检测问题，目前开展了一系列具有仿生微结构通道的可穿戴检测贴片的设计与制备，包括仿汗腺结构的图案化单向输水织物贴片、仿银杏叶脉的微流控通道等，自发将汗液从皮肤表面运输到嵌入的电极表面，有效避免新旧汗液在检测过程中的混合问题，并可用于汗液中的代谢物质高灵敏度检测。

## D18-50

### MOF 电催化剂的设计与构-效关系研究

赵慎龙\*

国家纳米科学中心

高效低廉的 CO<sub>2</sub> 转化催化剂的制备对于提高新能源技术以及重要化学品生产过程的效率极为关键。过渡金属-有机-无机碳材料，凭借其比表面积大、孔道结构可控、组分可调以及结构明确等显著特性，展现了成为高性能催化材料的巨大潜力。然而，该材料在电催化小分子催化方面的应用容易受到其导电性能差、活性中心易包埋等固有属性的限制，为此我们创建了配位微环境调控新策略，通过对活性位点几何与电子结构的精准调制，从而使催化反应的活性和选择性大幅度提升。借助于原位谱学技术与计算相结合的策略从原子层面上揭示了催化活性来源、本征构-效关系及增强作用本质。系列性成果实现了过渡金属-有机/无机碳催化剂在电化学 CO<sub>2</sub> 转化领域的应用，使该过程中的能源消耗大大降低，反应过程中的选择性以及稳定性进一步提高。

## D18-51

### 高稳定性超疏液涂层的构筑与实际应用探索

张俊平\*

中国科学院兰州化学物理研究所 资源化学与能源材料研究中心

针对超疏液涂层实际应用的瓶颈问题开展针对性研究，突破了超疏液涂层机械稳定性、耐压性和耐候性差的问题，揭示了机理，在国内外率先实现了超疏液涂层的实际工程应用，包括 5G 天线罩/雷达罩防雨衰、输电线路防结冰、危化品自清洁生产、智能矿山等。

## D18-52

### 拓扑凝胶机器人及其自发持续运动

吴子良\*

Zhejiang University

水凝胶具有丰富的刺激响应特征，成为构筑软驱动器的理想材料。针对凝胶驱动器响应速度慢、模式单一、智能化不足的问题，我们通过结构设计，利用外场诱导力学失稳，实现了凝胶快速驱动。通过电场诱导纳米片取向方法，制备了各向异性水凝胶。在光、热刺激下发生快速等体积变形。在此基础上通过激光扫描，将凝胶动态变形转化为蠕动、爬行等运动机能，发现局部变形与摩擦动态协同的新机制。光热效应导致凝胶网络发生亲疏水性转变，改变了凝胶表面与基板间的摩擦系数。光照部位温度上升导致高摩擦，因而快速锚定；温度下降后，低摩擦发生滑移。这种动态调控机制使凝胶机器人可在光滑基板上发生双向运动。进一步，通过拓扑结构设计，构筑了三叶结、所罗门结、莫比乌斯环水凝胶机器人，通过凝胶的快速响应、自遮挡效应的协同机制，该类拓扑凝胶机器人可以在静态光照射下发生持续的滚动、旋转运动。

## D18-53

### 富镁非晶间质相增强人工牙釉质复合材料

李一迪<sup>1</sup>, 傅正义<sup>2\*</sup>

1. 江汉大学

2. 武汉理工大学

牙釉质是人体组织中最坚硬的材料之一，它是由羟基磷灰石纳米线通过多级有序结构组装而成。最近研究发现在成熟的天然牙釉质中存在的无定形晶间相可以提供更好的附着力，并作为结构增强相来提高机械性能。在本研究中，提出一种生物过程启示的两步矿化法，在室温条件下成功合成出具有富镁非晶间质相增强的氟磷灰石纳米棒阵列类牙釉质复合材料 (FAP-M)。原子探针断层扫描结果表明，氟磷灰石纳米

棒阵列中，镁离子在纳米棒边缘聚集，形成富镁非晶间质相结构。并揭示一种非经典单晶生长机制：在固有表面压力驱动下，初期纳米粒子相互接触，由内到外依次结晶重排，形成完整的纳米棒单晶。所制备的 FAP-M 复合材料表现出与天然牙釉质相当的机械性能，其硬度和杨氏模量分别为  $2.90 \pm 0.13$  GPa,  $67.9 \pm 3.4$  GPa，分别是不具有富镁非晶层氟磷灰石纳米棒阵列的 8.3 倍和 2.2 倍。

#### D18-54

##### **A bioinspired Au-Cu<sub>1.97S</sub>/Cu<sub>2S</sub> film with efficient low-angle-dependent and thermal-assisted photodetection properties**

田军龙\*

贵州大学

Inspired from the geological processes, this study develops an innovative low-concentration-ratio H<sub>2</sub> reduction method to reduce the stoichiometric Au-CuS nanoparticles to produce completely reduced stoichiometric Cu<sub>2S</sub> with “invisible” Au achieved for solid solution Au enhancement. A stable Au-Cu<sub>1.97S</sub>/Cu<sub>2S</sub> micro/nano-composite is then formed by spontaneous oxidation. From this composite, in combination with the biomimetic technology, an omnidirectional photoabsorption and thermoregulated film (Au-Cu<sub>1.97S</sub>/Cu<sub>2S</sub>-C-T\_FW) is designed and fabricated as a photothermal-assisted and temperature-autoregulated photodetector for broadband and low-angle-dependent photodetection that presents good performance with high responsivity (26.37 mA/W), detectivity ( $1.25 \times 10^8$  Jones) and good stability at low bias (0.5 V). Solid solution Au exhibit significantly enhanced photodetection (1000 times). This study offers a new concept for improving the stability and the photoelectric properties of copper chalcogenides. Moreover, it opens up a new avenue towards enhancing the performance of optoelectronic and photovoltaic devices using solid solution metal atoms and thermal-assisted, anti-overheating temperature-autoregulation.

#### D18-55

##### **纤维增强复合材料界面仿生构筑与强韧化机制**

穆正知, 宋文达, 王宇飞, 张芷嫣, 牛士超, 韩志武\*, 任露泉

吉林大学 工程仿生教育部重点实验室

纤维增强复合材料 (FRP) 因其卓越的力学性能而被广泛应用于“三航”领域高端装备关键部件, 但 FRP 层合板界面强度不高、韧性不足的突出难题严重制约了其在复杂工况中稳定、长效服役。受自然界大型猛禽启发, 本研究系统表征了雕鸮、黑鸢两种典型猛禽翼羽宏观结构特征, 揭示了精巧界面结构驱动翼羽强韧协调功能原理, 设计构筑了仿生跨尺度分级结构和仿生类机械互锁结构界面, 采用热压成型和真空成型技术, 制造了单层插入式和层层堆叠式两种类型的仿生 FRP 层合板样件。相较于传统 FRP 层合板样件, 仿生 FRP 层合板样件断裂韧性、抗弯强度和层间剪切强度分别提升 109%、40% 和 102%。结合有限元模拟和失效模式分析, 揭示了界面仿生构筑策略在 FRP 层合板强韧化中的作用机制, 为新型高性能 FRP 的创新设计提供了技术参考。

#### D18-56

##### **超浸润形状记忆聚合物界面材料**

成中军\*

哈尔滨工业大学

仿生超浸润材料在众多领域已经成为人们关注的焦点，影响材料浸润特征及相应功能应用的一个重要因素即为其微结构，如何对材料微观尺度结构进行智能响应调控对其浸润特征的影响极为重要。形状记忆聚合物能够在微纳米尺度上自发记忆并保持不同的形态，从而为材料表面微结构及其浸润特征的调控提供了便利。基于聚合物形状记忆效应，我们分别对一维管状材料，二维平面材料，三维多孔材料的结构形态进行了调节，实现了表面静态浸润特征，动态浸润特征，以及液滴智能渗透，可控输运等多方面的应用研究。利用形状记忆聚合物的记忆效应不但能够为新型智能超浸润材料的设计提供新的研究思路，同时有望在液滴超控，界面粘附调节等多个领域实现潜在应用。

## D18-57

### 高韧性动态共价高分子

郑宁\*

浙江大学

热固性高分子具备优异的加工便利性，在复合材料、涂料、胶黏剂等领域得到广泛应用。然而，典型的硬质热固性材料通常是无定形的，且具有较高的交联密度，表现出极高的脆性。同时，由于化学交联作用，这些材料无法进行重加工回收。高分子材料的聚集态结构一直是影响其力学性能的关键因素。如果能通过调节单体中官能团的反应活性，在聚合过程中构建有序的结晶或相分离结构，就能在不牺牲其加工便利性的同时实现优异的力学性能。方案一是利用巯基和异氰酸酯的点击反应，通过低粘单体直接聚合，获得了具有高韧性的结晶聚硫氨酯材料，其韧性与商品化高密度聚乙烯相当。方案二是通过调节环氧与氨的聚合反应动力学，使其在逐步反应过程中形成独特的纳米级相分离结构，从而赋予环氧卓越的力学性能。其中断裂应变达到 375%，拉伸韧性为 108.4 MJ/m<sup>3</sup>，比常规热固性材料（应变 2%-5%，韧性 3 MJ/m<sup>3</sup>）提高了近两个数量级。此外，两个体系中均含有动态共价键，动态键的可逆交换使得材料具备重加工性能，可以实现热固性材料的回收。该方法同时克服了热固性材料力学性能差和无法重加工的两大瓶颈，为高韧性材料的发展提供了全新的解决思路。

## D18-58

### 基于模量优化的凋亡细胞仿生材料设计

曾戎\*

暨南大学

受机体无炎性清除凋亡细胞和维持组织稳态的机制启发，凋亡细胞仿生作为治疗炎症相关重大疾病的新兴策略广受关注，但如何通过凋亡细胞仿生结合材料物性设计实现协同增效，抑制过强、过久的炎症反应，纠正组织稳态失衡甚至实现受损组织修复，仍然极具挑战。为此，我们分别构建了大/小尺寸的模量可调的含凋亡细胞“食我”信号——磷脂酰丝氨酸（PS）的仿生材料模型，通过细胞和动物实验探究其经巨噬细胞介导的抗炎效应及机制。

大尺寸凋亡细胞仿生材料模型为 PS 涂覆聚二甲基硅氧烷（PS-PDMS），其模量通过改变交联度，控制在范围：~1000 kPa 至~10 kPa。PS 涂覆对 PDMS 模量、水接触角和细胞相容性几乎没有影响，但不同的模量导致巨噬细胞（M $\phi$ ）表面的机械感受体整合素  $\alpha\text{v}\beta\text{3}$  或 Piezo1 介导的肌动蛋白聚合改变，进而通过 NF- $\kappa\text{B}$  和 PPAR $\gamma$  信号通路影响 M $\phi$  极化。较低模量的 PS-PDMS 在体内外均能更有效地抑制 M $\phi$  的炎症反应，可显著促进植入部位 M $\phi$  的 M2/M1 值增大。

小尺寸凋亡细胞仿生材料模型为采用薄膜分散-挤出法构建的含 PS 纳米脂质体（PSLs），其模量通过改变柔性调节剂的含量，控制在~100 kPa 至~0.1 kPa（采用原子力学显微镜基于赫兹模型测得）。采用流式

细胞术与共聚焦显微镜研究了 RAW264.7 细胞对 PSLs 的摄取行为, 结果表明, 模量较低的柔性 PSLs 更能抵抗  $M\phi$  的摄取, 但可与  $M\phi$  表面持久结合, 从而延长有效作用时间。进一步的抗炎促组织修复评价结果表明: 柔性 PSLs 更有效地抑制 LPS+IFN $\gamma$  诱导的  $M\phi$  向 M1 型极化和促炎因子 TNF- $\alpha$  表达, 同时促进 IL-4+IL-13 诱导的  $M\phi$  向 M2 型极化和分泌抗炎因子 IL-10 及促血管生成因子 PDGF-BB 表达, 显著提高糖尿病大鼠创伤模型创面中  $M\phi$  的 M2/M1 值, 促进创面修复。

上述结果表明, 柔性凋亡细胞仿生材料对巨噬细胞行为的协同调控作用有望更有效地促进炎症消退和促进组织再生修复, 可为“源于自然, 超越自然”的免疫调节生物材料设计及应用提供新思路。

## D18-59

### 受蜘蛛丝启发的非共价协同与动态交联聚合物材料

刘小孔\*

吉林大学

传统的合成高分子材料因大量消耗与难循环、难降解的问题已在全球范围内造成了严重的环境污染与资源浪费。面向可持续发展社会以及人类社会对高新科技的需求, 发展可持续性(可循环、可降解、可回收)与功能性的新型高分子材料成为高分子材料领域的重要发展方向。基于非共价键的超分子组装与交联从源头上为创制可持续性 & 功能性高分子材料提供了重要途径。然而, 因非共价键键能较小, 基于非共价键构筑的超分子聚合物链段或网络存在力学性能与稳定性差的问题。因此, 利用超分子科学的原理与方法创制可持续性 & 功能性高分子材料虽展现出巨大的发展空间, 但却面临重要挑战。近年来, 我们课题组将超分子科学理念融入到高分子材料创制中, 围绕“如何利用非共价键的多重协同与动态可逆性调控并增强非共价交联聚合物的力学性能与稳定性”这一科学问题, 建立了“非共价协同与动态交联聚合物”研究体系; 提出了“拓扑限域非共价交联”的策略, 实现了聚合物体系中多重非共价键协同性与动态性的有机结合; 突破了非共价交联聚合物力学性能与稳定性差的瓶颈, 调和了高分子材料增强与增韧的矛盾; 发展了系列具有超强超韧力学性能与近似于共价交联稳定性的可持续性高分子材料; 构筑了系列具有定制化力学性能的导电高分子材料并开发了其在柔性电子、人机交互、精准数字诊疗等方面的应用。

## D18-60

### 功能性蓝相液晶

王京霞<sup>1,2\*</sup>, 江雷<sup>1,2</sup>

1 中国科学院理化技术研究所

2 中国科学院大学

蓝相液晶因其独特的三维自组装超结构、多重外界刺激响应性、实时可重构性和优异的光学性能等吸引了研究者的广泛关注, 在柔性光电器件中具有重大应用潜力。然而迄今为止, 仍然缺乏对蓝相液晶多级结构和相变过程的实时观测, 对功能特性的发掘仍然不足, 从而限制了其实际应用发展。我们通过对蓝相液晶自组装过程的研究, 引入可聚合液晶单体和非液晶性单体, 实现了大面积、高质量、自支撑的多色单畴蓝相液晶光子晶体薄膜的制备; 进一步通过合适的聚合物稳定体系拓宽了蓝相液晶的温域(-190~310 °C), 并结合同步辐射、透射电镜等多手段详细研究了其相转变过程; 利用蓝相液晶的刺激响应性研究了蓝相液晶光子晶体薄膜在形状记忆聚合物方面的应用; 结合喷墨打印技术, 发展了多色精美的蓝相液晶“活”图案; 基于蓝相液晶谐振腔实现了高品质蓝相液晶激光, 并进一步将其激光温域扩宽至超过 400 °C(-180~240 °C)。这些工作极大的促进了功能性蓝相液晶在显示、防伪、激光等领域的应用拓展。

关键词: 蓝相液晶, 功能性, 图案打印, 激光, 相变

参考文献

[1] Yang, J.; Liu, J.; Guan, B.; He, W.; Yang, Z.; Wang, J.; Ikeda, T.; Jiang, L. Fabrication and Photonic

Applications of Large-Domain Blue Phase Films. *J. Mater. Chem. C* 2019, 7 (31): 9460–9466.

[2] Liu, J.; Liu, W.; Guan, B.; Wang, B.; Shi, L.; Jin, F.; Zheng, Z.; Wang, J.; Ikeda, T.; Jiang, L. Diffusionless Transformation of Soft Cubic Superstructure from Amorphous to Simple Cubic and Body-Centered Cubic Phases. *Nat Commun* 2021, 12 (1): 3477.

[3] Meng, F.; Zheng, C.; Yang, W.; Guan, B.; Wang, J.; Ikeda, T.; Jiang, L. High-Resolution Erasable “Live” Patterns Based on Controllable Ink Diffusion on the 3D Blue-Phase Liquid Crystal Networks. *Adv. Funct. Materials* 2022, 32 (15): 2110985.

[4] Liu, J.; Chen, Y.; Jin, F.; Wang, J.; Ikeda, T.; Jiang, L. Single-, Dual-, Triple, and Quadruple-Wavelength Surface-Emitting Lasing in Blue-Phase Liquid Crystal. *Adv. Mater.* 2022, 34 (9): 2108330.

[5] Chen, Y.; Zheng, C.; Yang, W.; Li, J.; Jin, F.; Li, X.; Wang, J.; Jiang, L. Over 200 °C Broad-Temperature Lasers Reconstructed from a Blue-Phase Polymer Scaffold. *Adv. Mater.* 2022, 34 (47): 2206580.

[6] Chen, Y.; Zheng, C.; Yang, W.; Li, J.; Jin, F.; Shi, L.; Wang, J.; Jiang, L. Super-Wide Temperature Lasers Spanning from -180 to 240 °C Based on Fully-Polymerized Blue Phase Superstructures. *Adv. Mater.* 2024: 2308439.

## D18-61

### 3D 打印仿生金属人工骨

徐超\*

吉林大学

人口老龄化使骨骼损伤问题日趋严峻，优质金属人工骨短缺问题亟待解决。受限于制造技术，人工骨仍面临在孔隙率、机械性能和降解速率等方面与人体骨不匹配的问题，严重影响骨植入治疗效果。以人工骨的机械性能和结构孔隙为例，由于金属和人体骨的材料属性不同，很难达成机械性能和结构孔隙与人体骨骼的同时匹配，可能会导致应力屏蔽、人工骨失效和骨组织再生困难等问题。针对此，我们提出在 3D 打印过程中采用金属造孔剂在人工骨中制造微观孔隙，独立于人工骨结构孔隙参数调节其机械性能，实现人工骨机械性能和结构孔隙的协同调控。除此之外，我们还针对金属人工骨的降解速率、孔隙尺寸、仿生结构、渗流特性和内部孔隙结构的协同调控开展了相关研究，以探索各方面性能都与骨骼匹配的仿生金属人工骨的可能性。

## D18-62

### 液滴动力学中的物质运输机制

李二强\*

中国科学技术大学近代力学系

作为流体力学的一个热点问题，液滴研究在流体力学与能源、材料、气象学、生命科学、数学、医药学等学科交叉融合中发挥着重要作用。近年来我们关注了液滴动力学中的物质运输问题，包括液滴蒸发中的分子扩散与吸附、液滴撞击中的飞溅与气体截留等。这些问题具有多尺度、非线性、流动奇异性等特征，对其开展精细研究极具挑战性。通过高时空分辨实验测量与理论分析，我们发现了液滴蒸发、驱动、撞击等过程中的物质运输机制，获得了蒸气介导的液滴间长程作用力统一形式、液滴与基底接触瞬间截留气膜形貌的尺度律、液滴与表界面间相互作用中液膜早期生成演化规律等。报告还将简述上述结果在传染病防控、流动减阻等应用中的重要价值。

关键词：界面流动，液滴动力学，实验流体力学，物质运输，高速成像

**D18-63****Furcated Droplet Self-Propulsion on Crystalline Surfaces**

Xin Tang

Southern University of Science and Technology

The directed, long-range self-propulsion of fluids on solid surfaces is fundamental to biological/chemical analysis, thermal management, desalination, water harvest, and numerous other fields. Asymmetries such as chemical/charge inhomogeneity and topological anisotropy are conventionally pre-patterned on target surfaces to break the symmetry of contact lines, enabling transport of droplets along well-defined directions. If no asymmetry or external force is provided, droplets propel isotropically, a situation observed for self-propulsion of small Leidenfrost droplets on hot and smooth surfaces ( $\sim 200$  °C). When we liberate a cold droplet ( $\sim 7$  °C) on a lubricated piezoelectric crystal (lithium niobate) at ambient temperature, the droplet instantaneously propels for a long distance ( $\sim 50$  times of droplet size). Unlike the Leidenfrost droplet which moves towards random direction, the motions of droplets on the crystal are furcated. Depending on the crystal plane that interfaces with the droplets, the self-propulsion can be unidirectional, bifurcated, and even trifurcated. In the absence of any macro-/micro-asymmetry, the intrinsically orientated liquid motion originates in the anisotropy of crystal structure that occurs at a scale seven orders of magnitude lower than the droplet size. This surprising furcated self-propulsion comes from a unique cross-scale multi-physical interaction, thermoelastic-piezoelectric coupling, enables an innovative way to delivery and transport liquids.

**D18-064****二维超细纳米蛛网材料**丁彬\*<sup>1</sup>

1. 东华大学

静电纺纤维材料具有纤维直径细、孔隙率高、孔道连通性好等优点，在过滤分离领域展现出良好的应用前景，但目前传统静电纺纤维的平均直径多在 100 nm 以上，限制了其应用性能的提升，进一步细化纤维直径是解决上述问题的关键。受蜘蛛网结构启发，研究者近年来制备了一系列仿蜘蛛网结构的二维超细纳米蛛网材料，本报告综述了该材料的成型及结构调控方面的研究工作：（1）发明了静电纺/喷新方法，通过调控高压静电场中高分子溶液在喷丝口处的受力状态，同步喷射出荷电射流与微小液滴，制备出静电纺纤维和仿蜘蛛网结构的二维网状纤维（网中纤维直径  $< 20$  nm）复合材料。（2）提出了一种将高分子量、低浓度聚合物溶液直接喷射成纳米蛛网的新技术——“静电喷网”，以静电纺纤维为接收基材，通过调控荷电液滴簇的形变-自组装过程，在静电纺纤维表面制备了纤维直径为 10 nm~40 nm 的仿生纳米蛛网材料。（3）发明了“蒸发诱导自组装”的成网方法，通过将细菌纤维素纳米纤维与静电纺纤维基材进行尺寸适配，在静电纺纤维表面制备了网中纤维直径约 40 nm 的仿生细菌纤维素纳米蛛网材料。（4）提出了“非溶剂诱导相分离”的聚合物溶液成网新思路，研究了非溶剂诱导聚合物分子链在静电纺纤维表面自组装的成网过程，制备出仿生超细（约 40 nm）纳米蛛网材料。在上述仿生二维纳米蛛网研究的基础上，进一步探讨了纳米蛛网材料在高效空气过滤和水过滤领域的特效应用。

**D18-065****软骨痂钙化启发的内源性酶诱导生物矿化促骨再生策略**陈嵩\*<sup>1</sup>, 董立<sup>1</sup>, 过倩萍<sup>1</sup>, 李斌<sup>1</sup>

1. 苏州大学

引言：大多数骨骼通过软骨内骨化发育或重建，基于软骨内骨化的再生策略引起了广泛关注。矿化是软骨内骨化的关键步骤。然而，目前对于矿化如何影响软骨内骨化和骨再生尚不清楚。因此，我们拟基于内源性酶诱导矿化实现软骨内骨化，并研究其矿化机制。

材料与amp;方法：我们以封装软骨球、内源性碱性磷酸酶激活剂-DIPQUO、甘油磷酸钙的甲基丙烯酰化明胶水凝胶作为内源性酶诱导矿化体系。首先，在体外批量制备小体积软骨球，利用碱性磷酸酶染色等验证DIPQUO促进软骨球内源性碱性磷酸酶表达。其次，利用组织学染色以及扫描电镜等方法检测分析软骨球和水凝胶的同步矿化效果。随后，利用转录组学测序以及透射电镜研究软骨球矿化的潜在分子机制以及矿化过程。最后，采用大鼠股骨远端缺损模型验证内源性酶诱导矿化对于骨修复的影响。

结果与amp;讨论：具有软骨特征的软骨球可在体外被批量制备，且DIPQUO可显著促进其内源性碱性磷酸酶表达。同时，在体外内源性酶诱导矿化体系可以实现软骨球和水凝胶同步高效自矿化。转录组学测序发现，在内源性酶诱导矿化体系下，软骨球矿化过程的基因表达模式与软骨内骨化高度一致，并由Wnt/ $\beta$ -catenin和MAPK/ERK等信号通路介导。软骨球的矿化过程中，线粒体、溶酶体、囊泡的数量增加，表明软骨细胞向成骨细胞的转分化。在体内，大鼠股骨缺损模型证实了内源性酶诱导矿化体系可以在4周实现快速的骨修复。

## D18-066

### 柔韧抗撕裂耐疲劳自修复材料的仿生构筑及应用

傅佳骏\*<sup>1</sup>

1. 南京理工大学

柔性自修复材料兼具柔软、可拉伸、自愈合等特点，在软体机器人、可穿戴电子设备、可拉伸导热材料和仿生智能器件等重大新兴领域应用中备受关注。基于超分子弱相互作用(氢键、配位键、离子键等)对柔性聚合物链进行适度交联是构建柔性自修复材料的必要条件，然而其较低的键能致使合成的柔性自修复材料断裂韧性和疲劳阈值较低。上述内在的分子设计矛盾直接导致存在微裂纹的柔性自修复材料在长期循环变形过程中极易断裂，这会降低、甚至剥夺集成的可穿戴柔性电子设备的操作可靠性。目前，现有的多尺度增韧策略均会提高材料的强度和模量，从而牺牲材料的本征柔性。进一步，这些行之有效的多尺度协同“增硬-增韧”策略对提高柔性材料的耐疲劳性能作用不大。究其原因，常规的增韧机制需要在大应变下才能完全发挥耗能作用，而疲劳行为通常受制于小应变甚至微应变下的可逆弹性变形。针对上述问题，本团队以仿生结构设计为导向，开展了一系列工作来解决“柔性自修复-抗撕裂-抗疲劳”之间的本质对立问题，包括：仿生平滑肌微结构设计了柔韧抗撕裂自修复材料，在极大提高材料断裂韧性和介电常数的同时保持了材料的本征柔性；模仿人体跟腱组织“硬-软”分级结构设计了柔韧抗疲劳自修复材料，其断裂韧性创纪录地超越500 kJ m<sup>-2</sup>，是轻合金的3-5倍，同时其疲劳阈值超过4000 J m<sup>-2</sup>。这些研制的柔韧抗撕裂耐疲劳自修复材料可显著提升集成器件的耐用性、稳定性和可靠性。

## D18-067

### 仿生液体门控膜的响应性气/液跨膜运输调控

刘静<sup>1,2</sup>，侯旭\*<sup>1,2,3</sup>

1. 厦门大学化学化工学院，固体表面物理化学国家重点实验室，厦门，361005
2. 嘉庚创新实验室（IKKEM），厦门，361102
3. 厦门大学化学化工学院，固体表面物理化学国家重点实验室，厦门，361005

自然界中，生物经过漫长的进化历程展现出了精妙的结构和界面相互作用以操纵流体来维持生存，其独特的功能成为人类探索各种应用不断的灵感来源。比如，植物的气孔和木质部通过孔道内的液体层进行空气、水和微生物的交换，充满液体的肺泡微米孔在压力梯度下可逆开启或关闭，形成控制气体进出的液层通道。受此启发的仿生液体门控技术，利用毛细力将液体稳定填充在多孔膜孔道内，在静态固体多孔膜

与动态自适应液体的共同作用下，对气体和液体可控输运，相比于传统膜材料具有抗污染和节能的优势，在能源、生物医学、环境治理、航空航天等领域具有广泛的应用前景。近年来，基于液体门控技术开发的智能膜系统广受关注，为多相流体的跨膜输运调控带来了新的方法和途径。我们基于液体门控技术，从门控液体和固体多孔膜的设计及其与输运流体的相互作用出发，探索和开发了声、磁、热等非接触调控气/液跨膜输运的响应性液体门控膜，为推动液体门控膜的功能多样化和应用广泛性起到重要作用。

## D18-068

### 特殊浸润性膜材料构建及分离纯化应用

赖跃坤\*<sup>1</sup>

#### 1. 福州大学

受自然界中具有超润湿性的生物表面的启发，仿生特殊润湿性分离膜材料引起了学术界和工业界的广泛兴趣和关注。在本次报告中，详细讨论了特殊浸润性膜材料的理论模型和制造策略。对构建具有抗润湿性能的坚固功能分离膜表面的策略进行了分类和讨论。这种特殊的润湿性膜材料具有自清洁、油/水分离、自修复、屏蔽、光催化、抗菌和空气净化性能。另外，报告人将探讨超浸润凝胶材料在多相分离（烟气过滤、油/水分离、凝雾集水）等领域应用。在每个部分中，重点介绍了具有代表性的研究，并强调了特殊的润湿能力和其他相关特性。以及简要讨论了未来实际应用中纯在困难和挑战。

## D18-069

### 仿生光活性胶体-从个体驱动到集群调控

郑靖\*<sup>1</sup>

#### 1. 厦门大学

仿生科学是一门从自然中汲取灵感，以设计制备具有相似结构、功能和行为的人工系统的学科。当中，受到自然界中各种生命活性系统的启发，研究人员已经开发出了一些简单的人造活性物质，例如自驱动胶体马达。这些人造活性物质为微观领域应用如靶向药物传递、微制造等提供了全新的思路。然而，人造活性物质的小尺寸和相对简单的结构限制了其实现更复杂功能的能力。如何在简单的结构基础上，实现活性物质个体与集群的多自由度调控，是实现实际应用的关键点。

基于此，本报告主要介绍了如何利用光场多通道可叠加、多参数可调谐的特性，来实现活性个体物质的多通道控制。另一方面，利用光化学反应诱导的扩散泳、渗流场等，可以调控多组分活性集群中个体间的相互作用力，从而实现跨尺度的可控集群行为。这种处于非平衡态的光响应活性物质，具有如动态响应、集群智能等特殊性质，有望为发展新型材料提供新思路。

## D18-070

### 三维无损 X 射线成像技术在仿生等研究中的应用

曹春杰\*<sup>1</sup>

#### 1. 卡尔蔡司（上海）管理有限公司

近年来，基于蔡司 X 射线显微镜的仿生学研究成果层出不穷。X 射线显微镜以其大样品高分辨率、高衬度三维成像能力，为基于自然界生物等结构的仿生学研究提供无损三维检测手段，在生物或材料微观结构解析和仿生学研究搭建起桥梁。本次报告内容主要如下：

1. X 射线显微镜技术机器先进性介绍
2. X 射线显微镜在仿生学研究中应用的典型案例介绍

**D18-071****黑色素仿生材料**李乙文\*<sup>1</sup>

1. 四川大学

黑色素是一类能在人和动物自我防护机制中起到关键作用的生物大分子材料，通常由二羟基吲哚单体在黑色素细胞中聚合生成。近年来，科学社会对黑色素的潜力充满期待，希望能在提升其关键性能的前提下满足高端制造的需求。然而，目前黑色素材料研究的主流方法还是在构效关系的基础上进行功能优化，进展比较缓慢。我们针对此难题，不拘泥于全面理解材料的复杂结构，建立黑色素研究平台，从大分子材料最基本的电子效应、空间效应和配位效应出发，突破天然黑色素胞内合成的种种限制，成功实现了对材料关键性能的有效提升。我们进一步利用这些新概念黑色素材料替代传统的高黑度（如聚苯胺、炭黑等）、防光（如钛白粉等）和抗氧化（如亚磷酸酯等）原料设计新型产品，如安全高效的防晒霜和染发产品，耐弯折哑光覆盖膜和超黑隐形涂料等，来推动军工、信息和大健康领域的产品升级。

**D18-072****仿生手性纳米材料调控淀粉样蛋白折叠与纤维化**高冠斌\*<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学

阿尔茨海默病(AD)药物研发是世界生物医药领域最具挑战的重大前沿。AD 最典型病理特征之一是  $\beta$ -淀粉样蛋白(A $\beta$ ) 错误折叠与异常纤维化形成不溶的 A $\beta$  斑块沉积在大脑内造成神经元死亡，进而导致患者失忆失语直至死亡。如何抑制 A $\beta$  错误折叠与异常纤维化是阻止 AD 病理进程的关键，同时也是 AD 药物研发的重要靶点。常规药物研发通过单抗等小分子来抑制 A $\beta$  产生或清除 A $\beta$  斑块的同时也造成了 A $\beta$  正常功能的丢失，导致 99% 药物研发失败。而生命系统中主要依靠手性生物膜和纳米尺寸的伴侣蛋白来通过静电、氢键、疏水和范德华力等非共价弱相互作用辅助蛋白质正确折叠并维持蛋白质稳态。受生命系统启发，报告人提出了利用仿生纳米材料的表面手性配体通过与生命系统类似的弱相互作用来调控 A $\beta$  折叠并维持其正常有益构象的创新思路，开发了一系列具有明确分子结构的仿生手性纳米材料，实现了对 A $\beta$  蛋白错误折叠与异常纤维化的完全抑制甚至逆转，并初步解决了仿生手性纳米材料穿越血脑屏障难题，在动物模型实验中取得初步疗效，为 AD 治疗药物临床前研究奠定了基础。

**D18-073****一种仿绿色植被光谱涂层的制备**祖梅\*<sup>1</sup>，周浩言<sup>2</sup>

1. 国防科技大学
2. 湘潭大学

天然绿色植被作为最主要的地表背景之一，开展其模拟物理特性的仿生材料研究，无论是军事领域还是日常生活领域都具有重要意义。在此，我们通过固相高温烧结合成法制备群青绿颜料，进一步将其与氯

化锂、聚乙烯醇复合制备了仿绿色植被光谱涂层。以分子筛为硅铝骨架源制备群青颜料具有良好的耐高温性能，系统研究了制备工艺、原料配比等因素对群青产物结构及光谱特性的影响，以获得满足光谱要求的群青绿颜料。利用群青颜料的多孔结构负载氯化锂，提高仿生涂层的整体吸湿性能，从而模拟绿色植物在近红外波段的水分吸收带反射特征，最终制备出的仿生涂层与植物叶片最高光谱相似系数可以达到0.951。基于群青绿颜料制备的仿生涂层在模拟绿色植被光谱方面具有较大潜力，大幅拓展群青颜料的应用范围与发展前景。

## D18-074

### 用于健康管理的仿生界面材料

姚希\*<sup>1</sup>

1. 香港城市大学

可穿戴技术在个性化健康管理和医疗中的应用引起了广泛关注。一方面，已开发的可穿戴设备实现了生理状态监测、疾病预防与诊断、健康数据管理等多种应用。另一方面，个性化健康管理的快速发展对可穿戴设备的多功能性提出了新的要求，例如，当设备佩戴在人体上时，能够在大而频繁的形变下保持机油功能和低能耗。基于上述需求，我们课题组开发了一系列仿生柔性导电材料，研究了它们在不同形变下、体相和表界面的机电性能，并探索了它们在可穿戴设备、健康管理等领域的应用。

## D18-075

### 生物矿化启示的低温制备高硬度和高断裂强度的文石块体材料

胡辉冯<sup>1</sup>，汪琦航<sup>1</sup>，傅正义<sup>1</sup>，邹朝勇\*<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学

致密陶瓷通常在高于 1000°C 的温度下经过粉末烧结得到。相比之下，生物体可以在温和的条件下使用无定形前驱体产生生物矿物。此外，生物矿物的高密度赋予其高硬度，而它们的多级结构也增强了它们的断裂韧性。我们通过原位结晶和致密化无定形碳酸钙（ACC），在低温（80 °C）下制备了由致密纳米晶体组成的文石陶瓷。硬度和弹性模量可分别达到 3.2 GPa 和 65.6 GPa。深入探讨了相应的致密化和结晶机理，并强调了水在纳米颗粒融合和 ACC 结晶过程中起着关键作用。我们进一步以 ACC 和纤维素纳米纤维为原料，通过原位结晶制备了仿贝壳珍珠层块体材料。该材料的硬度达到 3.8 GPa，模量达到 70 GPa，抗弯强度为 160 MPa，明显高于以往的研究报道，与天然贝壳珍珠层相当。因此，我们的研究为低温制备致密陶瓷提供了新的策略和思路。

## D18-076

### 4D 打印仿生结构陶瓷材料

刘果\*<sup>1</sup>，吕坚<sup>2</sup>

1. 中国科学技术大学

2. 香港城市大学

The four-dimensional (4D) printing for ceramics was developed in 2018, which helps enhance the geometrical flexibility of ceramics (Guo Liu et al. Jian Lu\*, Sci. Adv., 4, 8, eaat0641, 2018). A paradigm for a one-step shape/material transformation, high-2D/3D/4D-precision, high-efficiency, and scalable 4D additive-subtractive manufacturing of shape memory ceramics with original/reverse and global/local multimode shape

memory capabilities has been proposed (Guo Liu et al. Jian Lu\*, Adv. Mater., 35, 39, 2302108, 2023). Based on the development of various ceramic precursor materials and local re-ceramization technology, 4D printing of heterogeneous ceramics with controllable deformation and 3D printing of shape-keeping heterogeneous ceramics have been realized (Guo Liu1, Xinya Lu1, Xiaofeng Zhang1 et al. Jian Lu\*, J. Mater. Sci. Technol., 201, 210-221, 2024). Recent results about 4D printing of biomimetic structural ceramics will be introduced. Finally, multiple perspectives of the additive manufacturing of structural materials have been raised and illustrated (Xinya Lu1, Guo Liu1, Jian Lu\*, Addit. Manuf. Front., invited review; Guo Liu1, Xiaofeng Zhang1, Xuliang Chen1, Yunhu He1 et al. Jian Lu\*, Mater. Sci. Eng. R Rep., 145, 100596, 2021; Guo Liu1, Yunhu He1, Pengchao Liu1 et al. Jian Lu\*, Engineering, 6, 11, 1232-1243, 2020).

**D18-077****基于仿生微纳孔材料的能源传感体系**张振\*<sup>1</sup>

1.中国科学技术大学

在自然界中，细胞膜上离子通道和离子泵中的精妙智能传输过程与信号传递，电位调控，能量转换与存储等多种生命活动息息相关。相关仿生体系的研究不仅对于我们理解生命体传质过程，而且对解决盐差能转换等相关应用领域中的关键瓶颈都有着重要意义。受生命体离子通道的结构与功能启发，我们构筑了基于仿生微纳孔材料的纳流离子传输膜，总结出了利用结构、电荷、以及界面浸润性协同作用调控离子传输进而实现功能性增强的新策略，并进一步将生命体以蛋白质离子通道为核心的能源与传感机制引入到人工微纳米通道，构筑了多种高性能能源传感体系。

**D18-078****基于蛋白质类淀粉样聚集的表界面设计**杨鹏\*<sup>1</sup>

1.陕西师范大学

**D18-079****仿生碱金属离子通道与能源应用**高军\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所

**D18-080****仿生超疏液表界面材料海洋腐蚀防护研究**张斌斌\*<sup>1</sup>

1.中国科学院海洋研究所

**D18-081****单分子层有序多孔膜中的纳米流体**李连山\*<sup>1</sup>

1.国家纳米科学中心

**D18-082****实现损伤检测与快速愈合的耦合仿生弹性膜基防冰材料**刘黎明\*<sup>1</sup>

1. 广西大学

兼具大变形和快速愈合能力的抗润湿膜基材料在复杂工况下具有更强的适应性和可靠性，且其较低的固-液接触面积和界面粘附力对防/脱冰应用需求而言意义重大。本研究提出了一种具有动态超疏水性和光/电响应愈合性的超拉伸弹性膜（S-TPU），并利用铸膜工艺使得 S-TPU 与复杂结构之间表现出极佳的共形能力。S-TPU 在交变载荷作用下拉伸至 400%-1000%应变，经 2000 次拉伸循环后，表面液相滚动角仍不高于 5°。更重要的是，S-TPU 具有光热和电热响应性，可实现基于焦耳热动态分布的秒级损伤检测和跨尺度可视化自修复过程，即使经断裂性损伤，在光/电热协同激励下 90 秒内愈合效率达到 99%。通过分析聚合物基体中 TPU 链段、活性端基、可逆酯交换键和氢键的动态变化，揭示了 S-TPU 的自愈合机制。此外，针对被动防冰表面的冰-固互锁现象，从多维仿生角度提出了一种非均相润湿的凹凸耦合微纳结构。分析了结构形态和空间润湿差异对表面冷凝液滴驱离和界面冻结粘附的协同作用机制，阐明了关键参数变化对低温界面传热和液滴冻结相变的影响机理，以克服冻结过程中液气界面向结构间隙的粘附和渗透。本研究赋予疏冰表面损伤检测和循环愈合的能力，为解决被动式防/脱冰表面在湿冷环境、机械损伤等极端工况下应用的技术难点提供新方法。

**D18-083****仿生材料——交叉科学的前沿**俞书宏\*<sup>1</sup>

1. 南方科技大学

2. 中国科学技术大学

**D18-084****具有特殊表面浸润性的多孔复合材料的制备与应用**王洋\*<sup>1</sup>

1. 吉林大学

万物交互皆始于表面，表面特性与体相多孔结构的融合赋予了复合材料全新的功能。聚焦表界面科学与多孔材料这一交叉领域，我们通过调控材料的表面特性和体相孔结构，设计并构筑了绝热和高极性的超浸润多孔膜材料，分别开发了其在传热和液体分离领域的应用，取得了系列创新成果：（1）提出了在极端高温条件下利用绝热无机多孔膜实现液体超浸润的策略，颠覆了液体在高温表面悬浮的经典物理效应，解决了两百年来传热学的难题，并基于此研发了一种结构热装甲，实现了液体对极端高温表面的高效冷却；（2）利用无机多孔膜与不同液体极性相互作用的差异，提出了一种全新普适的分离原理和策略，首次实现了对任意不相溶混合液体的高效分离。

**D18-085****气凝胶限域固液复合材料**盛智芝\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

自然界通过固体和液体复合塑造了各种奇特的材料。受到自然界的启发，借助多孔材料的毛细作用，通过表界面设计在微纳多孔材料中引入功能液体，可形成一类全新的仿生微纳限域固液复合材料，带来丰

富的界面性质, 可实现抗污、节能、减阻、门控行为、自适应行为、及选择性吸附等性能[1-2]。近期, 我们借助气凝胶的高孔隙率和高比表面积, 发展了一系列气凝胶限域固液复合材料, 探索了其在气体吸附、气体分离及能源管理等领域的应用[3]。我们提出了气凝胶原位限域固液复合纤维, 通过石墨烯纤维主动吸湿实现了水分的纳米限域, 阐明了纳米多孔材料与水分子之间的微观作用机制[4]。该材料展现了高吸附容量和快速吸附动力学; 并实现了优异的吸附式制热/制冷性能; 由于水分的纳米限域, 该材料还具有宽频的微波吸收效果(带宽达到 9.69 GHz)。进一步, 发展了气凝胶共型限域固液复合材料, 在保留气凝胶孔隙的同时在孔内共型复合了纳米级厚度的功能液体, 实现了高效的 CO<sub>2</sub> 吸附与 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 选择性分离[5]。该固液复合材料具有优异的结构与热稳定性, 并实现了宽温域宽湿度范围对 CO<sub>2</sub> 的高吸附能力、快速吸附速率、高气体选择性以及高循环使用寿命。该研究为开发高效的碳捕获材料及气体分离材料提供了新的设计思路。

#### 参考文献

[1] Sheng, Z.#; Wang, H.#; Tang, Y.; Wang, M.; Huang, L.; Min, L.; Meng, H.; Chen, S.; Jiang, L.; Hou, X.\* Sci. Adv. 2018, 4: eaao6724.

[2] Sheng, Z.#; Zhang, M.#; Liu, J.#; Malgaretti, P.; Li, J.; Wang, S.; Lv, W.; Zhang, R.; Fan, Y.; Zhang, Y.; Chen, X.; Hou, X.\* Natl. Sci. Rev. 2021, 8: nwaa301.

[3] Sheng, Z.; Zhang, X.\* Science 2023, 382: 1358.

[4] Hou, Y.#; Sheng, Z.#; Fu, C.; Kong, J.\*; Zhang, X.\* Nat. Commun. 2022, 13: 127.

[5] Jiang, H.; Hou, Y.; Liu, Z.; Yuan, R.; Du, Y.; Ji, X.; Sheng, Z.\*; Zhang, X.\* Small 2023, 19: 2302627.

## D18-086

### 抗冲击复合纳米防护涂层的仿生设计与制造

黄威\*<sup>1</sup>

1. 华中科技大学

轻质抗冲击结构和防护材料在国防领域至关重要。舰船等在海洋滩涂环境下其复合材料部件易受到沙石冲击和异物碰撞等发生磨损和损坏, 极大地增加了深远海航行的维护成本。因此, 如何在大幅度增加重量和影响功能的前提下, 提高结构材料的持续抗冲击能力以应对复杂环境下的服役需求是亟需解决的关键问题, 在国防领域有着重要的意义。碳纤维增强复合材料由于其轻质、耐腐蚀、高强度的特点被广泛应用于舰船、飞机、风电叶片等各类结构中。但由于其较低的断裂韧性以及抗冲击性能, 复合材料在低速和高速冲击下易发生分层与纤维断裂。船舶结构在受到冲击、震动和碰撞时, 极易发生失效。如何提高碳纤维增强复合材料等结构材料的抗冲击性能是复合材料和力学等相关领域重点关注的问题之一。自然界的生物结构材料如贝壳、骨、牙齿等经过数亿年的演化后, 具备优异的力学性能, 为高性能工程材料的设计和制备提供了灵感和思路。针对目前防护涂层材料硬度和韧性很难兼顾的问题, 本课题通过模仿螳螂虾前螯中由有机无机相结合的材料和多层级结构的特点, 采用氧化铝和碳化硅等硬质陶瓷微纳米颗粒和壳聚糖、聚氨酯等柔性高分子, 成功制备了具备多层级结构的抗冲击涂层, 对复合材料基底的抗冲击性能进行了有效提升。

## D18-087

### 纳米多孔仿酶催化剂的可控合成及其性能调控

李国栋\*<sup>1</sup>

1. 国家纳米科学中心

向天然酶学习, 构建高效稳定的仿酶催化体系具有重要意义。新兴的多孔材料不仅具有精确可调的结构以及类酶的限域反应空间, 而且易于修饰、稳定性高, 在仿酶催化研究中独具潜在优势。本次报告内容

围绕着新兴多孔纳米催化剂的可控合成及其仿酶催化性能展开，包括以下 3 方面的内容：1) 提出了超薄共轭微孔纳米片中仿酶单金属位点电子态非局域调控的合成策略。利用空间位阻效应，构筑了超薄纳米片，同时调控了单金属位点电子态，实现了高效催化 CO<sub>2</sub> 环加成。2) 发展了金属有机框架材料(MOF)节点上引入单齿配体调控氧化物簇氧化态的合成策略。在金属节点上嫁接仿酶 Fe-O 簇，同时配位三氟乙酸调控其氧化态，协同催化甲烷直接氧化。3) 发展了在 MOF 框架内构筑仿酶“纳米口袋”的合成策略。在 MOF 节点上引入不同尺寸的单齿配体构筑纳米口袋，利用单齿配体的变构效应促进金属节点高效催化乙酰丙酸酯氢化制备  $\gamma$ -戊内酯。该系列研究工作可为新型高效仿酶纳米催化剂的设计和可控制备提供新思路。纳米多孔仿酶催化剂的可控合成及其性能调控。

## D18-088

### 旋转式多材料 3D 打印仿生异质螺旋结构材料

宋正义<sup>1</sup>，李旺轩，刘庆萍\*<sup>1</sup>

1.吉林大学

生物螺旋结构特征赋予了生物材料可调的力学性能。受此启发，一种适用于异质材料的螺旋式共挤出 3D 打印装置被设计研发。系统探究了打印控制参数对于异质螺旋线条结构特征的影响规律，制备了多种通过旋转控制产生的结构化材料。采用刚柔两种树脂基材料，探究了螺旋程度对于打印线条力学性能的影响规律，并控制螺旋程度的变化实现在单一部件力学性能的区域定制，制备了仿云杉梯度螺旋化结构，有效缓解了悬臂梁连接处的应力集中效应。选用异质水凝胶材料，开展基于异质螺旋化水凝胶结构的 4D 变形行为研究，并借用仿真模拟对比验证了多种螺旋结构化水凝胶结构的变形模式。所提出的旋转式多材料 3D 打印方法有望实现仿生螺旋结构化材料的定制化设计与制造。

## D18-089

### 仿生光热调控材料

李垚\*<sup>1</sup>

1.哈尔滨工业大学

随着全球能源短缺和环境恶化问题的日益严峻，高效能源利用与环境保护的紧迫性愈发凸显。在这一大背景下，光热调控材料应运而生，作为一项创新的能源调控技术，其重要性不言而喻。这类材料具备精准调控太阳光和红外光特性（如振幅、频率和相位）的能力，从而实现对热传导和辐射过程的有效控制，进而精确调节物体温度，提供隔热、集热、散热等多重功能。在光热调控材料的大家族中，仿生微结构光热调控材料因其独特的光学、热学特性和精妙的结构设计，备受科研人员的瞩目。这些材料出色光热调控性能，使其在航天智能热控、军事伪装及节能智能窗等领域展现出巨大的应用潜力。

本团队秉持向自然学习的理念，引入前沿的仿生光热调控结构，突破传统光热调控体系的局限，在航天智能热控、军事自适应伪装、节能智能窗等国家重大战略领域积极布局并付诸实践。以下是我们的研究工作：首先，向自然学习，探寻蝴蝶、变色龙、沙蜥等生物所展现的先进光热调控能力，并研究其内在的光热调控结构机理。致力于将这些自然界的智慧融入设计，构建独特的仿生超构光热调控器件设计体系。然后，基于光热场效应和模拟计算，针对特定应用的光谱特性需求，进行正向设计器件结构。并搭建了一个先进的制备、加工、测试一体化平台，用于制备和表征覆盖紫外、可见、红外乃至微波波段的超宽、多谱段的光热调控器件，从而实现这些器件在“双碳”目标、航天以及国防等国家重大战略领域的特色应用和重大创新。最后，紧跟科技前沿，利用人工智能和机器学习等先进技术，实现了器件设计方法从正向计算光热性能到以光学性能逆向输出器件结构的重大转变，显著提升设计效率，突破传统设计方法性能瓶颈。团队始终以服务国家重大战略为最终目标，积极推动相关技术的迭代升级，为实现科技强国贡献力量。

**D18-090****光驱动柔性智能材料及自主运动研究**胡颖\*<sup>1</sup>

1. 合肥工业大学

自然界中的生物能够在外界环境中持续自主运动。通过仿生设计出能够自主变形运动的柔性智能器件以及软体机器人具有重要的基础研究和应用价值。作为柔性智能器件的核心之一，柔性智能材料具有能将外部能量刺激转换为机械变形的优异特性，在近些年得到了广泛的发展。然而，目前大部分的柔性智能材料在外部能量刺激下仅能产生单次变形运动，而无法实现持续的机械变形输出。针对于此，本次报告将主要围绕具有自主运动的光驱动柔性智能材料方面的一些研究工作。首先，我们制备了具有卷曲形状的纳米碳薄膜智能驱动材料，在此基础上设计了一种能在恒定光照下产生持续自振荡波动运动的智能驱动器，该驱动器在光照下能以波动传播的方式自主地、连续地向光源爬行，表现出了飞蛾扑火的趋光运动智能特性。其次，我们制备了基于黑磷碳管复合结构的光驱动智能材料，并且通过引入反馈结构实现了驱动器在恒定光照下的自振荡变形以及趋光定向运动。通过在光驱动薄膜上安装负载，实现了在恒定光照下的连续自振荡变形，且振荡的振幅和频率都可以调节。除了以人工光源作为能量源外，我们还发展了能利用自然太阳光的基于梯度层状结构的 MXene 薄膜光驱动智能材料，并通过仿尺蠖的结构设计实现了其在自然太阳光照射下的自主定向运动；发展了基于碳纳米管的能实现太阳光照射下自主趋光运动的柔性驱动器。以上工作作为设计能自主变形运动的柔性智能器件和微型软体机器人提供了新的途径。

**D18-091****基于鼓膜应变诱导结构的仿生触觉感知器件**葛进\*<sup>1</sup>

1. 中山大学

仿人机器人作为人工智能的物理落地，已成为当前科技革命的一个核心角色。接入 ChatGPT 大模型后，仿人机器人的学习和操作能力得到显著增强。然而，目前仿人机器人的触觉感知皮肤在力学特性和传感功能上与人类皮肤相比仍有较大差距，难以满足复杂交互场景的需求。触觉感知皮肤不仅要具备基本的应力应变感知功能[1,2]，还应能够感知物体的物理属性[3]。我们借鉴人类皮肤对物体硬度和黏附力的感知机制，发展了一种鼓膜式仿生触觉感知器件[4]。通过原位观测鼓膜的形变过程，我们发现诱导应变量并不简单地随着物体杨氏模量的降低而增加[5]，物体的泊松比对诱导应变量也有显著影响。基于这一发现，我们大量测试了不同泊松比和杨氏模量的模型材料，探索了鼓膜的形变规律，并通过机器学习实现了对物体泊松比和杨氏模量的同时感知。此外，根据人类皮肤在感知物体黏附力的形变机制，我们研制了一种具有压拉双向感知功能的鼓膜式触觉传感器，能够在—个传感单元上同时检测压力和面外拉力，并能实时解耦传感信号，保持基线的稳定性。通过分析接触压力、接触时间与黏附力之间的关联特性，该传感器能够通过压力和拉力信号，准确区分不同物体间的黏附力水平。总体而言，我们提出的鼓膜式传感结构，具有类似人类皮肤的诱导应变特性，有望显著提升触觉传感器对物理属性的感知能力，为提升人形机器人理解复杂环境的能力提供了新的思路和可能性。

**D18-092****纳米孔石墨烯基纳流体：从机理到应用**王路达\*<sup>1</sup>

1. 北京大学

纳米限域空间下流体的输运行为显著区别于体相，且在分离、传感和能量转换等众多应用中起到重要作用。一方面，揭示纳流体的输运机制对于理解基本的物理和化学现象，如反应动力学、界面相互作用、表面摩擦、热涨落等具有重要意义；另一方面，利用这些机制来调控（亚）纳米范围内的输运过程，可以对纳流体器件中分子输运的设计和控制进行指导。由于有序的结构、可调节的性质和易于修饰的特点，石墨烯成为纳流体输运研究的理想材料之一。

本征石墨烯不透过除质子外的几乎所有离子分子，因此石墨烯的可控缺陷引入是研究零维石墨烯纳流体的关键步骤。我们开发了制备均匀孔径的纳米多孔石墨烯膜的方法。通过解耦缺陷位点的成核和生长，实现了窄的孔径分布。纳米孔石墨烯的孔径尺寸范围从亚纳米的选择性气体分离，到几纳米大小的生物分子的分离。通过一种共价功能化方法和一种预锚定启用的定向修饰方法，以调整石墨烯纳米孔中的官能团和相关的输运性质。考虑到生长和转移过程中不可避免的较大缺陷，提出了一种锚定 COF 的纳米孔石墨烯膜设计，以同时实现高通量和高选择性。

进一步地，官能团为纳流体的限域空间提供了新的自由度。通过控制氮气等离子体，制造出高选择性的质子交换膜。通过协同调控孔径大小和原位共价修饰的化学性质，可以实现不对称的离子传输行为和高效的单价金属离子筛选（ $K^+/Li^+$ 选择性约为 48.6）。此外，直接利用 CVD 石墨烯中不可避免的晶界以及其活性位点与等离子体反应，从而控制离子传输并进一步提高质子电导和选择性。

我们还将理论与实际应用进行结合，制备大面积石墨烯分离膜用于特定场景。通过可放大的石墨烯生长转移及纳米孔引入方法，制备了分米级大面积单层纳米孔石墨烯膜和稳定性增强的双层石墨烯膜，用于基于分离的精密仪器检测。进一步，为制备膜组件，设计了一种由纤维增强结构支撑的大面积纳米多孔石墨烯分离膜，该膜具有出色的抗拉和抗弯能力。其断裂应力、断裂强度和拉伸模量比现有研究提高了 1-2 个数量级，在经过 10,000 次重复弯曲后仍然完整，为石墨烯膜在实际分离应用奠定了基础。

### D18-093

#### 纳米复合材料的仿生调控

赵赫威\*<sup>1</sup>

1.北京航空航天大学

针对纳米结构单元难以调控、多级次宏观尺寸仿生构筑难以实现、微观结构与性能的构效关系不明晰等科学问题，围绕纳米材料的制备与形貌调控、组装与结构设计、应用探索等研究，设计制备了多种综合性能优异的仿生纳米复合材料。发展了一维、二维纳米材料的普适性化学合成方法，可控制备出系列力学、光学性能优异的纳米结构单元，阐明了纳米材料形貌、物相控制规律及性能调控机理，提出了力学耗散、光学透过的新机制；开发了系列纳米材料宏观尺寸仿生调控的新方法，实现了三维互锁等多级次微纳结构的可控构筑，提出无机桥连、有机桥接的界面增强策略，制备系列高强、高韧、高透明的纳米复合材料；建立了晶体-非晶纳米复合材料用于牙齿修复的新方法，制备了迄今与天然牙釉质结构和性能最为接近的类牙釉质复合材料，揭示了多尺度、多级次微纳结构在力学增强方面的关键作用，助力仿生牙修复材料的发展。

### D18-094

#### 仿昆虫复眼微纳复合结构多功能聚合物表面

李娟\*<sup>1</sup>

1.陕西师范大学

昆虫复眼（如蚊眼、蛾眼）是由无数个表面具有纳米渐变乳突阵列结构的微米小眼六方密排构成的。这种微纳复合结构不仅使昆虫具有超宽的视场和超敏锐的感知能力（依赖于微米小眼的排布和构成），而且具有宽谱减反的功能（纳米渐变乳突使折射率自上而下渐变）和冷凝微滴自驱动弹离性能（乳突的顶部能够有效降低固固和固液粘附）。如果能够在光学材料表面人工仿制这种微纳复合结构，则不仅能够获得

大的视场而且能够解决反射、雾、霜和污染物等因素对光学和光电器件的影响。

我们首先基于氧化铝模板的热聚合方法成功的在玻璃表面印制了聚合物仿生纳米乳突膜。由于硅烷偶联剂 3-氨基丙基三乙氧基硅烷 (KH550) 分别和玻璃表面以及聚合物的羟基形成了稳定的共价键, 因此聚合物仿生纳米膜能够牢固的粘附在玻璃上。该表面在经低表面能化学修饰后同时展现出优异的宽谱减反、防污、防雾以及防霜性能。其在可见光 (400-800 nm) 范围内的平均透过率可由普通玻璃表面的 93.1% 升至 98.7%; 经喷雾 10 min 后的透过率为 96.6%, 而普通表面仅为 82%; 将其完全没入石墨粉并拉出后其透过率为 95.3%, 而普通表面仅为 41.5%; 在 -20 °C, 相对湿度为 75% 的环境下 10 min 该表面仍能够保持很好的透过率。进一步, 我们通过电化学氧化技术实现了具有微米凹坑与纳米渐变孔复合的氧化铝模板, 并以聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 为例, 基于热聚合制备了仿生微纳复合多功能扩散板。该表面由微米级的突起与纳米级乳突复合而成, 能够在改变光路使光照射区域增加 (雾度) 的同时降低反射, 从而使样品具有高透 (可见光范围内平均透射率 93%) 和高雾度 (90%) 的性能。该表面经低表面能修饰后同样展现出优异的防污性能。然而, 聚合物纳米乳突结构力学稳定性差, 非常容易遭到破坏。为了解决这个问题, 我们通过电镀的方法, 基于微纳复合氧化铝模板得到与之互补的微纳复合镍模板, 之后利用纳米压印得到反昆虫复眼结构 (即微米凹坑与渐变纳米孔复合结构), 该结构不仅在可见光范围内具有高达 98.5% 的平均透过率以及 88% 的雾度, 而且具有优异的力学稳定性能。

研究所得的新型多功能表面有望应用在 LED 照明、太阳能电池以及激光雷达等领域当中, 提高能源的利用效率以及器件的使用舒适度。由于电化学制备的氧化铝模板和镍模板的工业兼容性, 该方法也有望成为开发批量化生产新型微纳多功能膜新工艺的基础。

#### D18-095

##### 仿生功能表面模板微纳制造技术探索

牛士超\*<sup>1</sup>

1. 吉林大学

#### D18-096

##### 面向人形机器人的仿生柔性承载材料

王坤阳\*<sup>1</sup>

1. 吉林大学

#### D18-097

##### 仿生动态吸能: 黏性软材料的作用

刘俊杰\*<sup>1</sup>

1. 北京工业大学

历经亿万年的自然选择, 生物材料进化出精巧的微结构以适应严苛的生存环境, 它们的动态力学性能如抗冲击、缓冲减振等常常优于传统材料, 近年来备受关注。但生物材料微结构复杂, 为理解其动态力学行为带来了挑战。本文以交错结构生物材料为研究对象, 首次提出“动剪滞”模型, 明确应力波的传递过程, 揭示出应力波在邻近增强相之间存在同步化的趋势, 发现基体的模量与粘度对生物材料的抗冲击能力具有关键作用。本文阐明增强相与基体“刚柔并济”的防护机理, 并提出抗冲击复合材料设计的仿生策略。在此模型基础上, 本文进一步研究了不同载荷条件下交错结构仿生材料的动态力学行为, 包括带隙特性、减振滤波、缓冲吸能等, 重点揭示软基体的关键作用, 并发现增强相的几何特征对交错结构仿生材料的动力学行为具有重要影响, 可显著提升仿生材料的阻尼耗能。本文还探讨了增强相的混杂效应, 增强相的混杂打破了应力波的同步化, 并产生了新的带隙, 为进一步大幅提升交错结构仿生材料的抗冲击、减振滤波性能带来新思路。本文的研究为分析交错结构生物材料的动态力学行为提供了理论工具, 为设计高性能仿生材

料提供了新思路和新方法。

## D18-98

### 金簇分子对新冠病毒的抑制机制研究

高学云\*<sup>1</sup>

1. 北京工业大学

While gold compound have been approved for Rheumatoid arthritis treatment as it well suppresses inflammatory cytokines of patients, no such treatment is currently available for COVID-19 treatment in vivo . We firstly disclose gold cluster yields better therapeutic outcome than Remdesivir in COVID-19 hamster treatments as it is armed with direct inhibition viral replication and intrinsic suppression inflammatory cytokines expression. Crystal data reveals that Au (I), released from gold cluster (GA), covalently binds thiolate of Cys145 of SARS-CoV-2 Mpro. GA directly decreases SARS-CoV-2 viral replication and intrinsically down-regulates NFκB pathway therefore significantly inhibiting expression of inflammatory cytokines in cells. The inflammatory cytokines in GA-treated COVID-19 transgenic mice are found to be significantly lower than that of control mice. When COVID-19 golden hamsters are treated by GA, the lung inflammatory cytokines levels are significantly lower than that of Remdesivir. The pathological results show that GA treatment significantly reduce lung inflammatory injuries when compared to that of Remdesivir-treated COVID-19 hamsters.

## D18-99

### 异/同手性糖肽的手性自组装研究

陈利民<sup>1</sup>, 周云龙\*<sup>1</sup>

1. 国科温州研究院

具有显著不同立体化学特征的糖类和肽是生命系统中重要的手性分子伴侣，并且经常共价连接形成糖肽。然而，在糖肽自组装过程中，糖和肽的分子手性如何协同编码糖肽组装体的螺旋手性仍知之甚少。在这项工作中，我们构建了两组异手性（heterochiral）和同手性（homochiral）糖肽异构体（即 L-FFFK-D-Gal, D-FFFK-D-Gal, L-FFFK-D-Glc, D-FFFK-D-Glc）。对异/同手性糖肽的手性自组装行为进行了系统的比较研究，揭示了它们在水凝胶黏弹性、超分子手性形貌、内部分子堆积模式和聚集热力学方面的显著差异。特别是，在相同的条件下，异/同手性糖肽出乎意料地自组装形成明显不对称的螺旋纳米结构。此外，全原子分子动力学（MD）模拟显示，异手性和同手性糖肽组装体之间的螺旋手性差异与其不同的内部分子堆叠模式密切相关。总之，这些结果表明，糖和肽的分子水平手性协同决定了糖肽组装体的超分子水平螺旋手性。揭示糖肽自组装从分子到水凝胶的异/同手性效应，对于精确调节自组装糖肽手性纳米纤维水凝胶以优化其物理化学性质和生物功能具有重要意义。

## D18-100

### 仿生自驱动流体操控界面的设计及功能集成

曹墨源\*<sup>1</sup>

1. 南开大学

经过亿万年的进化，生物界面对流体的操控能力近乎完美。高效、低耗、多功能、高柔性是此类具有流体操控能力的生物界面的共同特征，这也为人类在相关科学技术领域的革新及发展提供了重要的思路和

方法。基于对仿生超亲水界面上快速液体铺展现象的理解，作者发展出一系列具有定向、自发液体运输能力的界面材料，并将其应用在雾水收集器、蒸汽冷凝器以及微流控芯片相关方向的优化过程。本项工作中，作者以高柔性材料为基础，通过构建不对称连通沟道，实现液体的超快铺展过程。进一步，通过整合外接流体泵或蒸发泵，实现收集液体的定向外排。相关成果有望为伤口敷料、快速冷却、大气集水等领域提供可行的解决方案，为仿生流控界面在器材集成方向上的探索奠定基础。

## D18-101

### 形状记忆仿生附着结构及应用

何青松\*<sup>1</sup>

1. 南京航空航天大学

在生物系统中，可切换的粘附是很常见的。近年来，许多学者致力于研制可切换的仿生黏附材料。然而，制造一种具有高黏附性能和优异动态切换性能的生物启发型黏附材料仍然是一个挑战。本文成功地研制出一种形状记忆聚合物仿生黏附材料(SMPBA)，很好地实现了高附着力(约 337kPa)，相对较低的预载荷(约 90kPa)、较高的粘附-预负荷比(约 3.74)、较高的切换比(约 6.74)，并易于脱落，这归因于通过调节温度和形状记忆效应控制的模量和接触面积。由于共形接触，SMPBA 在不同粗糙度(Ra=0.021-10.280)的各种表面(硅、铁和铝)上表现出 80-337kPa 的黏附强度，体现了出色的表面适应性。设计并制造了 SMPBA 着陆装置，以实现无人机在各种表面着陆和脱离。本研究提供了一种新型的可切换仿生黏附材料和无人机着陆方法。

## D18-102

### 冰晶形成机制揭示与应用

王健君\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院理化技术研究所

## D18-103

### 细胞仿生电化学传感

刘艳玲\*<sup>1</sup>

1. 武汉大学化学与分子科学学院

细胞能灵敏感应微环境中的机械力信号，通过激活胞内信号通路引发一系列生物化学反应，最终调节细胞形态和功能，该过程被称为力学信号转导。尽管电分析化学方法在生物体系检测方面发挥了重要作用，但常规电极缺乏弹性，难以顺应细胞形变以准确获取生化信息。为了适应细胞动态形变，我们研制了电化学性能优异的金纳米管、碳纳米管和导电聚合物，构建了系列基于一维纳米电极材料网络结构的柔性可拉伸电极<sup>[1]</sup>；然后，通过在电极表面引入超小尺寸金属纳米颗粒、酞菁钴仿生分子和光催化剂纳米材料，显著提升了传感器检测灵敏度、细胞黏附性、抗污染等性能<sup>[2]</sup>；在此基础上，利用柔性可拉伸电化学传感器原位诱导细胞/组织形变，在单/群体细胞、模拟组织以及真实组织层次实时监测了机械力触发的信号分子瞬态释放<sup>[3]</sup>，为细胞力学信号转导研究提供了一种仿生实时动态监测技术。

参考文献：

1.a) Liu, Y. L.; Jin, Z. H.; Huang, W. H. et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, 55, 4537-4541; b) Liu, Y. L.; Amatore, C.; Huang, W. H. et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2017, 56, 9454-9458; c) Yan, J.; Liu, Y. L.; Huang, W. H. et al. *Chem. Sci.*, 2021,12, 14432-14440; d) Yan, L. P.; Huang, W. H.; Liu, Y. L. et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202203757.

2.a) Fan, W. T.; Liu, Y. L.; Huang, W. H. et al. *Anal. Chem.* 2020, 92, 15639-15646; b) Qin, Y.; Liu, Y. L.; Huang, W. H. et al. *Adv. Sci.* 2021, 8, 2003738; c) Liu, Y. L.; Dong, W. G.; Huang, W. H. et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2020, 59, 4075-4081; d) Liu, Y. L.; Huang, W. H. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021, 60, 2757-2767.

3.a) Yan, J., Huang, W. H.; Liu, Y. L. et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2024, 63, e202403241; b) Qin, Y.; Huang, W. H.; Liu, Y. L. et al. *Device* 2024, 2, 100410; c) Zhao, Y.; Huang, W. H.; Liu, Y. L. et al. *ACS Nano*, 2024, 18, 6176-6185; d) Zhao, Y.; Huang, W. H.; Liu, Y. L. et al. *Adv. Mater.* 2023, 2305917.

## D18-104

### 论文题目溶液法光伏器件界面研究

周惠琼\*<sup>1</sup>

1. 国家纳米科学中心

近年来溶液法有机和钙钛矿光伏器件效率飞速提升，具有成本低、半透明及可溶液加工等特点，有望成为新能源产业的核心技术之一。目前，该领域面临的挑战是实现稳定高效的器件。光伏器件的界面决定了激子和载流子行为、界面复合及降解等重要过程，是决定器件性能的关键因素。由于材料或者制备方式的限制，器件内界面存在各种问题，如界面层稳定性较差，活性层易发生相分离或各相无序共存等。这些界面问题限制了最佳器件性能的实现。本报告将介绍我们在有机和钙钛矿太阳能电池界面研究的工作，包括提升界面稳定性、调控界面层宏微观浸润性以及促进活性层相界面纵向有序分布等。

## D18-105

### 神经仿生离子信息材料与器件

肖凯\*<sup>1</sup>

1. 南方科技大学

离子在智能生命体中至关重要，神经细胞中动作电位的产生、植物细胞光合作用、皮肤的压力感知等都和离子的定向传输密切相关。可以说，智能生命的语言是“离子”，而人工智能的语言是“电子”。因此，如何构筑基于离子传输的类脑计算器件，从而架起智能生命和仿生体系的桥梁，是我们未来面向脑-机混合智能的一个重要挑战。该研究方向是受生物蛋白质通道及其离子输运功能的启发，近年来随着纳米科学与信息技术的发展而兴起的最前沿和最活跃的课题之一。我们课题组围绕“神经仿生材料、类脑计算器件、神经调控技术”这一主题开展化学、材料、信息、生物等多学科交叉研究。通过仿生的手段构筑了一系列离子传输材料，通过调控其结构和界面性质，探究了限域空间/界面内可控离子传输的机制，实现了类脑的多种脉冲放电功能；在此基础上，基于深度神经网络（DNN）和脉冲神经网络的（SNN）的新型类脑算法，实现了低能耗、高通量的类脑计算；通过多尺度范围内构筑基于离子传输的神经拟态器件，实现了以“离子”为语言的类脑计算器件的构筑并用于生物信号/信息调控和“人工智能-生物智能”无障碍沟通。

#### 参考文献:

- [1] Kai Xiao.\* et al., *Sci. Adv.* 2024, 10, eadj7867.
- [2] Kai Xiao.\* et al., *Nat. Commun.* 2021, 12, 4650.
- [7] Kai Xiao.\* et al., *Nat. Commun.* 2019, 10, 74.
- [3] Kai Xiao.\* et al., *Natl. Sci. Rev.* 2021, 8, nwa231.

- [4] Kai Xiao.\* et al., Adv. Mater. 2020, 32, 2000218.  
[5] Kai Xiao.\* et al., Angew. Chem., 2024, e202401477.  
[5] Kai Xiao.\* et al., Angew. Chem., 2020, 59, 9067.  
[6] Kai Xiao.\* et al., Angew. Chem., 2019, 58, 12574.  
[9] Kai Xiao.\* et al., Angew. Chem., 2018, 130, 10280.  
[10] Kai Xiao.\* et al., Angew. Chem., 2018, 57, 151.

## D18-106

### 表面适应性可逆黏附材料的仿生构筑

薛龙建\*<sup>1</sup>, 张凯杰<sup>1</sup>, 罗小杭<sup>1</sup>

1. 武汉大学

为了能在不同物体表面爬行，动物进化出了的应对策略。其中，很多动物利用可逆黏附力来爬行，而黏附力主要依赖于脚掌表面的微观结构。受此启发的微柱阵列表面因此也被称为结构黏附材料。结构化的表面可以有效降低材料的表观模量，有利于材料与不同性质的表面形成良好接触。在分离过程中，单个微柱接触界面的应力分布对黏附强度具有决定性作用；而柱状阵列结构可以形成“接触细化”效应，提高黏附力。前人研究发现，T型末端的微柱可以将应力集中从接触边缘转移到中心区域，抑制了接触界面边缘裂纹的萌生，实现了黏附力的提高；但该结构在黏附-脱附循环过程中易损坏而导致黏附性能下降。针对这个难题，结合不同生物的结构特征，我们制备了具有径向和轴向模量梯度微柱阵列、末端带有微纳米凹坑的柱状阵列和硬核软壳结构等一系列，实现了分离界面处应力分布的可控调节，抑制了边缘裂纹的萌生和扩展，实现了黏附性能和结构稳定性的同步提升。结合高分子材料的玻璃化转变和相转变，实现了在空气中和水下与粗糙表面的共形接触，获得了远高于壁虎脚的黏附强度以及黏附力的可逆调控。结合微柱的不对称性设计，将结构化黏合剂的应用扩展到液滴操作和软机器人等领域，为结构化黏附材料的应用铺平了道路。

## D18-107

### 结构-功能一体化仿生芳纶吸波蜂窝材料制备及应用

杨斌\*<sup>1</sup>

1. 陕西科技大学

## D18-108

### 高性能人工肌肉材料用于软体机器人

刘春宝\*<sup>1</sup>

1. 吉林大学

离子聚合物金属复合材料（IPMC）驱动器由于其大变形和低电压下的快速响应，在软机器人方面显示出巨大的潜力。然而，由于背部松弛现象的存在，实现 IPMC 的较大形变依然是一项重大挑战。基于仿生学原理，我们通过溶液铸造和异丙醇辅助化学镀方法，设计了一种高性能的 IPMC 人工肌肉，并表现出极大的弯曲变形（125°）和超快的初始响应速度（1.09% s<sup>-1</sup>）。此外，IPMC 人工肌肉能够提升 11 倍自重的物体，并在持续 695 秒后没有表现出明显的背部松弛。该人工肌肉可应用于引导抓手机器人和机器人超

材料微架构中，在软体机器人中展现出极佳的性能。这项研究对开发无背部松弛的高性能人造肌肉提供了一种可行的方法，在生物医学和软体机器人领域具有广泛的应用潜力。

关键词：离子聚合物金属复合材料；人工肌肉；软体机器人

## D18-109

### 仿生限域化学反应的单分子电化学测量研究

应佚伦\*<sup>1</sup>

1. 南京大学化学化工学院，生命分析国家重点实验室

分子是保持物质化学性质的基本单元之一。单个分子间电荷传输及能量传递往往是在限域孔道界面上进行的，其是发生单个分子化学反应的基本途径之一，影响着单个生物分子执行生物学功能，有机合成反应的精准途径以及高效能源的转化等。纳米孔道单分子电化学测量是获得单个分子物理及化学信息最直接和最有效的手段之一，其关键在于构建与单个分子空间尺寸相匹配的限域测量界面，将单个分子的化学反应过程动态信息转化为可测量的时序性电信号。基于此，我们聚焦单分子化学反应过程的高通量精准测量与可控合成，以生物蛋白分子及无机材料等作为测量界面基本构筑单元，设计构建了每一个化学基团都精准可控的独创纳米孔道限域单分子界面，发展了限域界面电子隧穿理论模型，利用了非稳态“时频”信号变换方法分析并归纳了孔道识别基团、限域电荷传输、单分子测量精度之间的构效关系。进一步，通过调控限域“离子-质子”相互作用网络，加剧了孔道内瞬时局域电荷传输的变化，从而将难以探测的单分子动态反应过程增强为极易测量的离子流时序电信号，直接观察到了蛋白质分子原位限域环境中可逆巯基-二硫键转化过程的精确时间轨迹，测量了限域微环境中 pH 及氧气浓度对单分子反应速率的影响，提出了氧气介导的二硫键断裂反应新路径，从而指导了蛋白质限域反应微环境的理性设计，提高了单个蛋白质反应器的催化效率。

参考文献：

- [1] Ying, Y.-L., Hu, Z.-L., Zhang, S., Qing, Y., Fragasso, A., Maglia, G., Meller A., Bayley H., Long, Y.-T. *Nat. Nanotech.*, 2022, 17(11): 1136-1146.
- [2] Jiang, J., Li, M.-Y., Wu, X.-Y., Ying, Y.-L., Han, H.-X., Long, Y.-T. Protein nanopore reveals the renin-angiotensin system crosstalk with single-amino-acid resolution. *Nat. Chem.* 2023, 15(4): 578-586.
- [3] Liu, W., Yang, C.-N., Yang, Z.-L., Yu, R.-J., Long, Y.-T., Ying, Y.-L. Observing Confined Local Oxygen-induced Reversible Thiol/Disulfide Cycle with a Protein Nanopore. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 135(27): e202304023.
- [4] Li, X., Ying, Y.-L., Fu, X.-X., Wan, Y.-J., Long, Y.-T. Single-molecule frequency fingerprint for ion interaction networks in a confined nanopore. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2021, 60(46): 24582-24587.

## D18-110

### 时空动态和催化介导区室化的氰尿酸/聚腺嘌呤软 DNA 微滴凝聚物的重构

徐仕军<sup>1</sup>，欧阳煜<sup>2</sup>，秦云龙<sup>2</sup>，陈丹龙<sup>1</sup>，段志娟<sup>1</sup>，夏帆<sup>1</sup>，Itamar Willner<sup>2</sup>，黄福建\*<sup>1</sup>

1. 中国地质大学（武汉）

2. 耶路撒冷希伯来大学

研究描述了条形码功能化的氰尿酸/聚腺嘌呤三链稳定化的浓缩 DNA 微滴 (CDMD) 的组装。展示了条形码束缚 CDMD 通过表现出不同杂交长度的荧光“入侵”核酸进行动力学控制的时空区隔，以及“入侵”链的时间动态立足点介导的动态位移。通过应用邻硝基苄基磷酸笼状“入侵”核酸链实现了光触发的 CDMD

区室化重构, 同时, 通过设计荧光团修饰的双链入侵链, 在光响应笼状燃料链的存在下, 实现了单个微区隔 CDMD 到双区室 CDMD 的循环和可逆重构。

此外, 通过对荧光团修饰的双链入侵链进行适当的工程改造并应用光响应笼状燃料链, 实现了单区室和双区室 CDMD 的光诱导循环聚集/解聚集。此外, 还展示了 DNAzyme 功能化的微区室 CDMD 的光触发重组, 并实现了 DNAzyme 刺激的微区室 CDMD 的可切换重构。不同的 CDMD 系统模拟跨亚膜细胞器(例如线粒体或溶酶体)的细胞内信号通路。

## D18-111

### 商业 Nafion 膜从质子梯度中收集渗透能可超过 5.0 W/m<sup>2</sup> 的商业目标

侯琴<sup>1</sup>, 戴煜<sup>1</sup>, 张孝进<sup>1</sup>, 夏帆\*<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)材料与化学学院

大自然是推动绿色能源和技术发展的灵感源泉。在自然界所有形式的能量中, 离子梯度的化学势能是许多生物物种的基础。电鳗完美利用离子浓度梯度放电, 其无数个细胞内外形成的 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>浓度梯度产生高达 800 V 的放电电压[1]。受此启发, 许多具有离子选择性的膜被设计出来以提取海洋中的盐差能。除此之外, 工业酸性废水的质子梯度也蕴藏着巨大的渗透能。但是, 目前的膜材料无法在大面积测试条件下同时实现优异的化学/机械稳定性和高输出功率密度, 并且成本高、制造工艺复杂[2]。商业 Nafion 膜由于其较强的化学/机械稳定性, 良好的质子导电性与吸水率, 且具备高度的相分离形态等特性, 被广泛应用于燃料电池领域。这使其能够在高温和酸性环境下保持其质子传导性能, 成为利用酸性废水发电的理想选择。实验研究表明, Nafion 膜在 0.2 mm<sup>2</sup> 的测试面积下, 可获得 5.1 W/m<sup>2</sup> 的功率密度, 超过 5.0 W/m<sup>2</sup> 的商业目标[3]。将渗透能与低品位热相结合, 在 333 K 下, 功率密度可达到 8.1 W/m<sup>2</sup>。即使在 12.5 mm<sup>2</sup> 的大测试面积和高酸度条件下, Nafion 膜可以达到 2.1 W/m<sup>2</sup> 的高输出功率密度。通过将膜与离子选择性相匹配, 收集盐度梯度能量之外的渗透能为大规模转化渗透能提供了另外一种思路。利用绿色和可持续的方法捕获酸性废水中的渗透能, 有望缓解对全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严重。

## D18-112

### 基于局部电势驱动的纳流体离子传输用于超灵敏生物化学传感

初文婧<sup>1</sup>, 林美华\*<sup>1</sup>, 黄羽<sup>1</sup>

1. 中国地质大学武汉

受自然界生物离子通道功能的启发, 人工纳流体生物传感器已被证明是一种强大的用于低成本、快速和无标记检测多种生物分子, 包括离子、小分子、核酸、蛋白质、细胞和病毒的有效工具。对于传统的电驱动纳流体生物传感器而言, 其通过将纳流体界面上的功能探针与靶标之间的特异性相互作用转换为可测量的离子电流信号从而实现生物分子检测 [1]。然而, 对于一些电荷量少或浓度低的靶标, 靶标与探针相互作用引起的系统膜电阻变化非常微弱, 导致检测灵敏度受限。为了解决这一问题, 我们从光敏感离子通道蛋白—通道视紫红质 (ChRs) 中获得灵感, 这种离子通道蛋白对光具有高度敏感性, 并可将其光能转化为离子流并在单分子水平上响应光刺激的独特功能[2], 基于这一特性, 我们利用具有光电效应的仿生二维纳流体 MoS<sub>2</sub> 膜构筑了一种光响应纳流体生物传感系统, 在靶标与纳流体 MoS<sub>2</sub> 膜界面的探针特异性结合后仅引起膜电阻变化微弱的情况下, 其可高灵敏的影响光照条件下纳流体膜内部光生电子和空穴的分离, 从而促使局部膜电势以及光诱导的离子电流信号产生显著变化, 这种策略突破了传统电驱动纳流体传感所依赖的基于膜内阻显著变化实现生物分子检测的限制。最终基于这一机制构建的光响应纳流体生物传感系统在检测循环肿瘤 DNA (ctDNA) 和溶菌酶等生物分子的应用中展现出比传统电驱动策略高出 3 个数量级以

上的灵敏度。因此，这种光响应纳流体生物传感器的关键优势与传统纳流体生物传感器互补，在即时检测分析的应用中展现出了巨大潜力。

### D18-113

#### 基于 3D 光子晶体的荧光选择性增强 FRET 的多分析物传感

王艳艳<sup>1</sup>，黄羽\*<sup>1</sup>，夏帆<sup>1</sup>

1. 中国地质大学（武汉）材料与化学学院

荧光共振能量转移（FRET）由于其固有的简单性和高灵敏度在生物化学传感、单分子实验、细胞生理学和其他各种领域得到了广泛的应用。然而，FRET 供体和受体之间的能量转移效率很大程度上取决于局部光子环境，这是限制其在复杂系统或多分析物检测应用中的一个因素。光子晶体是指具有光子带隙特性的人造周期性材料，是受自然界的启发，如孔雀的羽毛，甲壳虫的背壳等，周期性排列的结构会在晶体表面形成相干衍射，在不同方向上反射出不同颜色的光。这让光子晶体具有在多维环境中操纵光的能力，显示出非凡的光学特性。本文基于三维拓扑光子晶体开发了一种荧光选择性增强吡啶橙（AO）-黄曲霉毒素（AFs）的 FRET 系统，目的是提高 FRET 的选择性和识别能力。通过探索光子阻带的角度依赖性，研究了不同三维拓扑结构光子晶体像素上的阻带分布。该方法对阻带匹配的光子晶体进行了选择性荧光增强，从而成功地区分了六种不同的黄曲霉毒素，并促进了对发霉食品样品的复杂多重分析。特别是在蓝-紫色结构颜色范围内的阻带，能够与 FRET 供体和受体的荧光峰位置匹配。这种排列使得三维三角星光子晶体能够有效地辨别含有六种不同黄曲霉毒素的混合样品，以及检测发霉土豆、面包、燕麦和花生中存在的黄曲霉毒素，这种方法的辨别准确率达到了 100%。这一创新策略不仅为建立多靶标辨别分析系统提供了新的途径，而且为各种黄曲霉毒素的定量检测提供了一种便捷的预处理方法。

### D18-114

#### 基于外表面探针功能化的纳米孔道阵列检测细胞内的未折叠蛋白质

作者<sup>1</sup>，作者<sup>2</sup>，作者<sup>3</sup>，... 乔玉娟<sup>1</sup>，胡晶晶<sup>1</sup>，胡宇昕<sup>1</sup>，段冲<sup>1</sup>，蒋文莲<sup>1</sup>，马群<sup>1</sup>，洪煜柠<sup>3</sup>，黄卫华<sup>2</sup>，夏帆<sup>1</sup>，娄筱叮\*<sup>1</sup>

1. 中国地质大学（武汉）

2. 武汉大学

3. 澳大利亚墨尔本乐卓博大学

许多神经退行性疾病的发生都与未折叠蛋白的积累有关。纳米孔道技术由于其具有无标记和高灵敏度等优点已经成为检测蛋白质折叠/未折叠状态的强大工具。然而，由于蛋白质不均匀的带电性、结构的各向异性以及纳米孔道的空间限制，利用纳米孔道平台的内壁检测具有相同构象的蛋白质也可能导致多个事件，从而给准确鉴定带来挑战。在此，我们开发了一个外表面探针功能化的纳米孔道阵列，它可以通过输出电信号和光信号检测未折叠蛋白质。检测原理是外表面探针中的马来酰亚胺基团可以与蛋白质半胱氨酸硫醇进行共价结合，从而诱导纳米孔道阵列的离子电流和荧光强度响应的变化。利用这种机制，该平台能够根据单个半胱氨酸硫醇基团的暴露来区分蛋白质的折叠和未折叠状态。这两种信号的整合增强了未折叠蛋白质状态鉴定的可靠性和灵敏度，并成功应用于区分正常细胞和亨廷顿舞蹈症突变细胞。该研究为精确分析具有不同构象的蛋白质提供了一种有效的方法，并有望促进蛋白质构象相关疾病的诊断。

### D18-115

#### 类珍珠质结构人牙适配型陶瓷-树脂复合材料的压缩疲劳性能研究

高科丰<sup>1</sup>, 谈国旗<sup>1</sup>, 刘增乾\*<sup>1</sup>, 张哲峰<sup>1</sup>

1. 中国科学院金属研究所

疲劳性能是决定结构材料能否达到实际使用要求的主要因素,但在开发新的仿生材料时往往很少被关注。特别是当类珍珠质结构复合材料用作义齿材料时,还需要满足循环咬合的服役需求。然而,尽管类珍珠质结构在材料增韧方面表现出显著的效果,但其疲劳性能仍有待探索。本课题组先系统探究了与牙釉质性能适配的仿贝壳“砖-泥”结构复合材料沿垂直于陶瓷片层取向循环加载时的压-压疲劳性能和损伤机制。结果显示该复合材料的疲劳极限超过了人牙咀嚼食物所承受的最大应力,并且呈现出微观“台阶”状断裂行为。复合材料的损伤行为和损伤机制与所施加的应力幅密切相关。随后,本课题组还研究了仿生结构类型(类贝壳片层结构和“砖-泥”结构)和结构取向(平行和垂直于陶瓷片层取向加载)对复合材料压缩-压缩疲劳性能的影响。研究结果表明两种仿生复合材料的疲劳性能和损伤机制与结构类型和取向密切相关。两种复合材料沿平行取向循环加载时都表现出更高的疲劳极限;沿相同结构取向循环加载时,“砖-泥”结构表现出比层状结构更高的疲劳极限。此外,类珍珠质结构能够通过诱导裂纹偏转、促进裂纹面之间的相互摩擦,以及通过树脂相的塑性变形来阻碍疲劳裂纹的扩展。研究结果将为类珍珠质结构复合材料的口腔应用提供实验基础,同时为新型抗疲劳材料的设计提供依据。

相关工作已分别发表于 *Scripta Materialia* 和 *International Journal of Fatigue* 期刊。

#### D18-116

##### 基于仿生离子通道的废水同步处理与盐差发电

潘尚发<sup>1</sup>, 张丽<sup>1</sup>, 李琪<sup>1</sup>, 刘学丽<sup>1</sup>, 高军\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所

生物离子通道能够以高通量、高选择性的方式传输特定的离子,这为细胞功能的精确调控奠定了基础。生物钾离子通道每秒传输一亿个离子,具有完美的  $K^+/Cl^-$  选择性。这种高效的分离是多重机制共同作用的结果,例如,这些通道具有埃级尺寸,可以适配目标离子并排斥较大的离子;通道表面具有丰富的基团可以与目标离子发生特异性识别。如果制备出这种结构相似,功能相同的仿生离子通道,并用于盐差发电,将实现超传统离子交换膜两个数量级以上的性能。

在脱盐等工业过程中会产生大量的高盐度废水,这些废水的处理成本极高,但同时也蕴含着巨大的盐差能,将其有效捕获可为盐差发电体系开辟新的应用空间,为新能源建设提供新途径。然而,由于在高离子浓度下德拜长度的消失,大多数传统的纳流膜会失去它们的电荷选择性,因此,高盐度废水中的盐差能收集是极具挑战性的。受生物离子通道的启发,我们提出利用金属有机框架膜在高盐度废水中实现高性能的仿生盐差发电。通过将带有磺酸基团( $-SO_3H$ )的聚苯乙烯磺酸钠(PSS)封装在孔径为 0.9 nm 的 HKUST-1 中,制备了 PSS/HKUST-1 金属有机框架复合膜,其中高盐度废水提供了高的膜外电导,而金属有机框架膜的亚纳米级孔道保证了高盐度下的电荷选择性,因此将膜测试面积放大到  $7\text{mm}^2$ ,功率密度仍可以稳定在  $1.7\text{W}/\text{m}^2$ ,这是迄今为止报道的纳流膜在大尺寸膜测试面积下的最高值。

我们还利用 Janus 氮化碳膜实现了同步的盐差发电和污水净化。膜 Janus 结构具有不对称的能带结构,能产生内建电场,可促进电子-空穴分离。因此,该膜表现出较强的光催化能力,能有效降解有机污染物并杀死微生物。此外,内建电场还能促进了离子传输,在模拟阳光照射的条件下,显著提升了盐差能转换的功率密度,高达  $30\text{W}/\text{m}^2$ ,并且无论是否存在污染物,发电性能都可以保持稳定。

#### D18-117

##### 仿生离子通道的构筑及其性能研究

作者<sup>1</sup>, 作者<sup>2</sup>, 作者<sup>3</sup>, ... 李琪<sup>1</sup>, 潘尚发<sup>1</sup>, 高军\*<sup>1,2</sup>,

1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所

2. 山东能源研究院

生物离子通道对于维持生命体正常的生理活动起着非常重要的作用,例如  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$  离子通道参与神经系统中信号传导,以及质子通道用于调节细胞的 pH 平衡,这些由特殊蛋白质构成生物离子通道具有高选择性、高渗透性,可以通过精准的尺寸匹配和丰富的结合位点实现特定离子的选择性跨膜运输。在本研究中,受生物离子通道启发,我们通过对配位基团和通道结构的调控,设计合成了沸石咪唑酸盐框架-65 (ZIF-65) 仿生钠离子通道。通过实验和理论计算研究发现,ZIF-65 仿生钠离子通道只传导钠离子而排斥钙离子。这是因为 ZIF-65 的中性- $NO_2$  基团作为配体促进  $Na^+$  的转运,0.34 nm 的孔径大小与生物钠通道的选择性过滤器相当,允许部分水合  $Na^+$  的运输。然而,对于  $Ca^{2+}$  来说,由于连接基团、狭窄的孔径大小和部分水合作用,阻止其运输的脱水能垒达 1.98 eV,这与打破共价键所需的能量相当,因此  $Ca^{2+}$  运输几乎被完全阻断。

受生物通道启发,结合上述材料的设计理念,我们进一步构筑了埃级尺寸的冠醚 (A15C5) 柱撑层状碱式硝酸锌仿生锂离子通道。通过多种效应的协同,包括通道的埃级尺寸、冠醚对碱金属离子的特异性识别功能以及与锂离子的强相互作用,可以高效富集锂离子,将锂离子电导提升多个数量级,实现高选择性锂离子传输。在极低  $Li^+$  浓度的人工海水中实现了 1422 的有效  $Li^+/Na^+$  选择性。此外,我们以共价有机框架 (COF) 材料构筑了仿生质子通道,通过 COF 层与层间极窄空隙实现了类似于生物质子通道的完美选择性。

## D18-118

### 仿生纳米通道离子检测

王艳琼\*<sup>1</sup>

1. 厦门大学

生物大脑中的神经活动与神经元细胞离子通道密不可分,受此启发,开发仿生离子纳米通道器件[1],通过离子通道控制离子的传输,深入探索纳米通道表面结构与电荷、通道与离子界面相互作用、界面诱导的离子聚集与解聚、吸附与脱附等界面性质对离子传输的影响[2,3],阐明纳米通道界面性质离子传输及离子浓度的不同响应。我们构建了一种可靠的单宁酸功能化的单玻璃纳米通道,单宁酸能够提供具有特定离子亲合能的多酚官能团,能够实现金属离子的特异性识别和超痕量检测[4],该系统显示出高效和快速的特征。理论计算和实验研究均表明纳米通道内表面的三羟基酚基团与不同金属离子之间的不同亲合能实现金属离子的有效区分,特别是结合能显著的铁离子。因此,这种单宁酸功能化的纳米通道系统具有在纳米限域空间中方便快捷识别多价金属离子的潜力,进一步促进仿生智能纳流器件在离子检测与物质传感等领域的应用。

参考文献:

- [1] Yaqi Hou, Xu Hou. Bioinspired Nanofluidic Iontronics. *Science* 2021, 373: 628-629.
- [2] Yaqi Hou#, Yixin Ling#, Yanqiong Wang, Miao Wang, Yeyun Chen, Xipeng Li, Xu Hou. Learning from the Brain: Bioinspired Nanofluidics. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2023, 14: 2891-2900.
- [3] Yixin Ling, Lejian Yu, Ziwen Guo, Fazhou Bian, Yanqiong Wang, Xin Wang, Yaqi Hou, Xu Hou. Single-pore nanofluidic logic memristor with reconfigurable synaptic functions and designable combinations. *Journal of the American Chemical Society* 2024, 146: 14558-14565.
- [4] Kan Zhan, Ziyi Li, Jun Chen, Yaqi Hou, Jian Zhang, Runqing Sun, Zhenxiang Bu, Lingyun Wang, Miao Wang, Xinyu Chen, Xu Hou. Tannic acid modified single nanopore with multivalent metal ions recognition and ultra-trace level detection. *Nano Today* 2020, 33: 100868.

## D18-119

### 仿生光热蒸发原理与装置的能质传输强化

王佳程\*<sup>1</sup>

1. 重庆大学

随着全球水资源危机的加剧,开发可持续的淡水生产技术显得尤为迫切。太阳能驱动界面光热蒸发作

为一种清洁、高效的海水淡化技术，引起了广泛关注。界面光热转换过程中能量转换率低和淡水产率不足已成为制约该技术发展的瓶颈。报告人围绕这一问题，首先基于植物蒸腾作用的认识和启发，构筑了一种具有低蒸发焓和抗菌性能的光热蒸发体。该蒸发体通过模拟植物蒸腾过程，有效提高了光热蒸发速率。此外，我们进一步探索了跨学科交叉的可能性，结合热管技术的原理，开发了一种类热管结构的太阳能光热海水淡化装置。通过优化能质转换和传输过程，该装置实现了约 40L/m<sup>2</sup>d 的淡水产率。这一创新不仅证明了跨学科交叉在提升能源利用效率方面的巨大潜力，也为未来太阳能驱动淡水生产的工业化应用奠定了基础。

## D18-120

### 仿生纳米流体离子基晶体管的构筑及运用

刘文超<sup>1</sup>，肖凯\*<sup>1</sup>

1. 南方科技大学

电压门控离子通道作为生命的晶体管，在神经细胞和肌肉组织方面起着信息传递的作用。通过构建以离子作为电荷载体的仿生晶体管，很可能会打破固态电子设备所面临的物理限制和能耗问题。受生命的晶体管的启发，我们报道了一种 p 型和 n 型双极性离子晶体管，在超低的栅极电压下可以实现 10<sup>4</sup> 超高开关比。进一步，基于离子晶体管构建了逻辑门的离子电路。此器件有望应用于生物传感、低能耗计算设备、生态友好监测和脑机接口。

关键词：仿生材料，纳米流体，离子晶体管，离子传输，离子通道。

#### 参考文献：

- [1] Wenchao Liu, Kai Xiao\*, et al., *Sci. Adv.*, **2024**, 10, eadj7867.
- [2] Tingting Mei, Kai Xiao\*, et al., *ACS Nano* **2024**, 18, 6, 4624–4650.
- [3] Tingting Mei, Kai Xiao\*, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, e202401477.
- [4] Y. Xue, X. Zhang\*, et al., *Science* **2021**, 372, 501-503.
- [5] F. J. Sigworth\* *Nature* **2003**, 423, 21-22.
- [6] C. Cheng, D. Li\*, et al., *Nat. Nanotechnol.* **2018**, 13, 685-690.
- [7] R. Fan, P. Yang\*, et al., *Nat. Mater.* **7**, **2008**, 303-307.

## D18-121

### 基于结构化离子压电水凝胶的仿生神经元构筑及神经调控应用

戴季卿<sup>1</sup>，肖凯\*<sup>1</sup>

1. 南方科技大学

生物触觉神经元可以感知外界刺激，并通过蛋白质通道上的离子输运进行信息传递[1]。仿生触觉神经元，如果兼具传感和突触功能，并能用离子信号进行神经调控[2]，在神经义肢应用方面将会有巨大的潜力。本课题中，我们提出了离子压电仿生触觉神经元，该仿生神经元基于离子水凝胶与定向排列的 PET 纤维组成的复合材料，利用凝胶网络中阴阳离子扩散系数不同，将压力刺激转化为离子电信号[3]。仿生神经元可以整合不同频率的信号，模拟电生理信号的时空整合功能。通过构建神经界面，仿生神经元可直接刺激坐骨神经进行神经调控。本研究结果为构建具有传感、计算和神经调控功能的离子人工神经提供了途径。

关键词：离子水凝胶，流动电势，仿生机感受器，仿生神经元，神经调控

#### 参考文献：

- [1] Qiancheng Zhao, Meng-Qiu Dong\*, et al., *Nature* **2018**, 554, 487-492

[2] Yuta Dobashi, John D.W. Madden \*, et al., Science **2022**, 376, 502-507.

[3] **Jiqing Dai**, Kai Xiao\*, et al., Device **2024**, <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100436>.

## D18-122

### 仿生高强高韧微纳复合材料

郭林\*<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学

针对传统工程材料强韧难以兼得的难题，围绕高强高韧纳米材料的制备与形貌调控、组装与结构设计、应用探索等研究，设计制备了多种综合性能优异的仿生高强高韧微纳复合材料。发展了非晶微纳材料的普适性化学合成方法，可控制备出系列力学性能优异的微纳米结构单元，阐明了微纳米材料形貌、物相控制规律及性能调控机理，提出了非晶增韧、应力偏转等力学耗散新机制；开发了系列微纳米材料宏观尺寸可控组装的新方法，实现了三维互锁、多尺度界面交联等多级次结构的可控构筑，提出非晶键连、无机桥连、有机桥接的界面增强策略，制备系列高强高韧微纳复合材料；建立了晶体-非晶纳米复合材料用于航空航天、牙齿修复等领域的新方法，制备了包括与天然牙釉质结构最为接近的多尺度类牙釉质复合材料在内的一系列复合材料，揭示了无机非晶纳米材料在力学增强方面的关键作用，助力仿生微纳复合材料的发展。

## D18-123

### 高性能纤维复材构件仿生设计及其多点柔性制造技术研究进展

韩奇钢\*<sup>1</sup>

1. 吉林大学

## D18-124

### 海洋生物功能蛋白应用探索

宋俊祎\*<sup>1</sup>，胡碧茹<sup>1</sup>

1. 国防科技大学

蛋白分子及其衍生物属于天然的纳米材料，由于其固有的生物相容性以及形成微纳自组装体的特性而获广泛研究，并且在诸多领域展现出特殊的应用潜力。本课题组以藤壶的水下粘附机制与乌贼的体色变化机制为原型，致力于海洋功能蛋白的生物机制挖掘与仿生应用探索。

以乌贼为代表的头足纲动物具备无与伦比的体色变化能力，而一类独特的反色素蛋白（reflectins）在其结构色呈色过程中起到了关键性作用。反射素蛋白是自然界中折射率最高的蛋白（~1.591），并能够对环境湿度、离子强度等条件变化做出动态响应。基于其独特的材料组成和动态自组织特性，反射素蛋白被制成了促进干细胞增殖分化的界面、具有导电能力的生物电极、具有红外特征调控能力的薄膜等功能材料，有望应用于组织工程、生物半导体、伪装工程等不同领域。

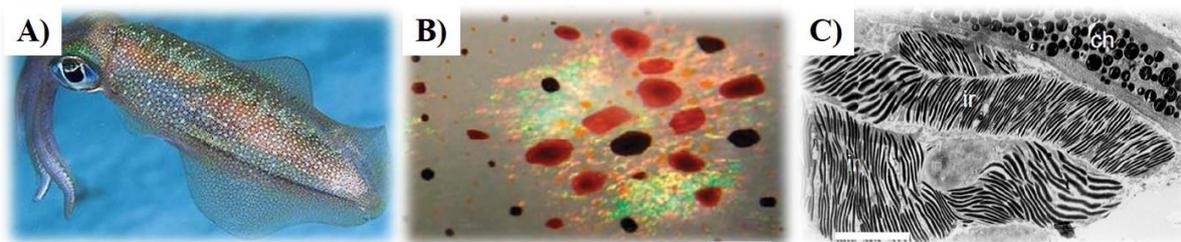


图1 A/B) 鱿鱼皮肤组织表面金属光泽的结构色；(C) 反色素蛋白构成的布拉格片层结构，标尺=5 μm。

藤壶则表现出了超强的水下粘接性能，依靠其多蛋白组分的藤壶胶，能够永久性牢固附着于几乎所有

水下设施的表面,为仿生粘接剂的开发提供了优良的模板。《中华本草》记载,藤壶作为药剂具有“制酸止痛,解毒疗疮”的功效。本课题组通过分子机制解析,发现藤壶胶原蛋白 cp19k 在通过其湿界面粘接性能对皮肤伤口进行修复的同时,还具有促进细胞迁移、缓解炎症反应等功能。与此同时, cp20k 胶原蛋白兼具界面粘接和促生物矿化的双重功能,其衍生多肽被证明具有独特的自组装特性及促进成骨细胞增殖分化的能力,在骨修复、牙齿修复等领域具有广阔的应用前景。

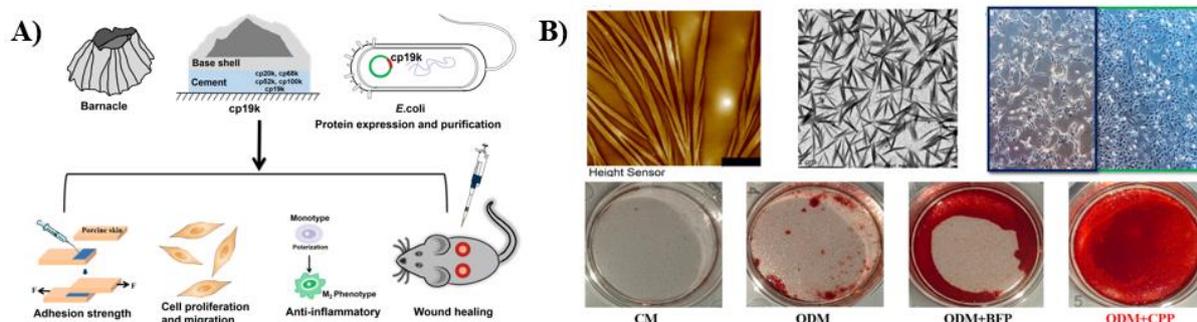


图.2 A) cp19k 的异源表达及其伤口促愈机制示意图; B)cp20k 衍生多肽促进成骨细胞增殖分化结果。

## References

- [1] Hanlon R T, Mathger L M, Bell G R R, et al. *Bioinspir Biomim*, **2018**, **13**(3): 035002.
- [2] Levenson R, Bracken C, Bush N, et al. *J Biol Chem*, **2016**, **291**(8): 4058.
- [3] Long P, Rylan K, Janahan, et al. *ACS APPL MATER INTER*, **2016**, **8**, 278.
- [4] Ordinario, D.D.; Phan, L.; Walkup, W.G.t., et al. *Nat Chem*, **2014**, **6**, 596.
- [5] Long P, Ward IV et al. *Adv Mater*, **2013**, **25**, 5621.

## D18-125

### 构建可注射磁性水凝胶用于肝癌多模式治疗的研究

作者<sup>1</sup>, 作者<sup>2</sup>, 作者<sup>3</sup>, ... 陆杨\*<sup>1</sup>, 闫旭<sup>1</sup>, 宋永红<sup>1</sup>

1. 合肥工业大学

肝癌治疗需要综合考虑患者的身体状况、肿瘤的大小、位置、分期等多种因素。单一治疗方案难以满足肝癌治疗需求。肝癌临床治疗指南指出,发展多学科交叉,多模式协同的肝癌综合治疗方案十分必要。

生物体内广泛存在着各种天然水凝胶,如细胞外基质、关节液等。通过仿生设计,可以制备出具有类似生物相容性、机械性能、自修复能力等特点的生物水凝胶材料,以满足医疗、药物释放、组织工程等领域的需求。本课题组通过磁性仿生组装策略,面向临床肝癌治疗需求,发展了一系列具备磁热、温敏、湿粘附、止血等功能的可注射磁性水凝胶,构建肝癌多模式治疗策略,旨在解决肝癌手术切除复发率极高,消融治疗副作用大、适用范围小及经动脉栓塞治疗效果不佳等临床导向问题。

## D18-126

### 肌肉启发的 MXene 基电化学致动器

陈少华\*<sup>1</sup>

1. 中山大学

电化学致动器(亦称离子致动器)是一种人工肌肉,具有轻便、柔软、安全(低压、常温)、节能等优势,在触觉交互、生物医疗、软体机器人等领域有诱人的应用前景。它通常由两电极夹层聚合物电解质构成,其中的离子在外部电压下能够进出正负极,导致二者产生应变差,使器件弯曲变形并输出机械力<sup>[1]</sup>。Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 具有优异的搞导电性、体积比电容、力学性能和表面极性,很有潜力作为电化学致动器的电极材料。然而原始 MXene 宏观膜沿平面方向的电化学应变很低,而且在潮湿环境和水系电解液中的存

储稳定性较差，这大大限制了其电化学致动器的宏观变形、输出力和使用寿命。为此，我们对 MXene 表面进行表面改性<sup>[2,3,4]</sup>，通过引入疏水基团增加了片层间距、缩短了层间结合力并大幅降低了低薄膜的吸湿性，从而大幅提高了薄膜的平面电化学应变以及在空气和水中的稳定性。采用原位 XRD、原位液体池 TEM、原位 AFM、原位红外等多种表征手段，观测到 MXene 片的各向异性电化学应变行为（片内应变远小于层间应变）和改性 MXene 片的平面滑移现象，提出了片层滑移致动新机理（类似肌肉纤维的滑移理论）。基于此，设计了 1 V 驱动的弯曲型半固态软体致动器，可以产生自重 100 倍以上的输出力；组合的“机器镊子”可以夹持自重 20 倍的物体并在 0 V 下维持夹持状态。

参考文献：

- [1] Shaohua Chen, Matthew Wei Ming Tan, Xuefei Gong, Pooi See Lee\*. *Adv. Intell. Syst.* 2022, 4, 2100075.
- [2] Shaohua Chen, Jing Hao Ciou, Fei Yu, Jian Chen, Jian Lv, Pooi See Lee\*. *Adv. Mater.* 2022, 34, 2200660.
- [3] Shaohua Chen, Shu Fen Tan, Harpreet Singh, Liang Liu, Mathieu Etienne, Pooi See Lee\*. *Adv. Mater.* 2024, 2307045.
- [4] Shaohua Chen, Harpreet Singh, Yangyang Xin, Liang Liu, Mathieu Etienne, Pooi See Lee\*. *To be submitted*, 2024.

## D18-127

### 框架核酸材料及生物应用

左小磊\*<sup>1</sup>

1. 上海交通大学

## D18-128

### 材料力学性能原位测试技术及其在仿生材料领域应用

刘长宜\*<sup>1</sup>，邢文娟<sup>1</sup>，于忠瀚<sup>1</sup>，杨凯升

1. 吉林大学

材料的微细观结构及其变形演化行为，是决定其力学性能的主要因素，应用力学性能原位测试技术，能够微小化的材料试验仪器与 SEM、CT 等表征技术联用，实现力学性能与材料微细观行为的同步表征。现有的原位测试仪器主要面向金属标准试样进行测试，在量程、功能等方面难以满足仿生材料特殊的测试需求。本研究自主研制了兼容 SEM 的系列化原位测试仪器，能够在 SEM 腔室内实现拉伸、弯曲、扭转、疲劳静态加载与高低温环境的构建，结合 EDS、EBSD 探测器与 DIC 技术，实现材料力学性能、微细观形貌、元素分布、晶体学信息与应变场的原位分析表征。基于此技术，针对昆虫结构、天然植物纤维、贝壳等材料的微细观力学行为开展了相关研究，为仿生材料的测试分析与表征提供了新的技术途径。

## D18-129

### 基于细长杆—囊泡组合结构的人造细胞构型演化

易新\*<sup>1</sup>

1. 北京大学

利用自下而上的思想，基于微米尺度囊泡，并通过物理化学方法在囊泡内部或表面组装分子材料，已成为设计和构建人造细胞的重要手段。蛋白纤维构成的细长杆与囊泡共同构成的组合体是一种典型的人造细胞，各部分的尺寸和力学性能决定了此种人造细胞的力学行为。从力学角度看，囊泡属于封闭空间，其内部的蛋白纤维属于受限弹性细杆，由于相互作用和特征尺寸上的不匹配，蛋白纤维与囊泡会发生复杂的力学相互作用。我们针对弹性纤维—囊泡这类由一维杆件和二维壳体构成的组合弹性结构，通过力学分析与理论建模，给出描述该系统非线性力学行为的理论框架，并针对受限开口和闭口纤维，系统探究纤维的弹性性能与长度对系统非线性力学行为和构型演化的影响。对于同时存在表面积和体积约束的囊泡，囊泡-纤维组合弹性系统表现出明显的各向异性行为，系统的空间对称性变得更加复杂。此外，弹性纤维的存在

使得囊泡在外载作用下更难以变形。研究成果有助于理解细胞形状调控的力学机制。

### D18-130

#### 生物过程启示的胞内蛋白聚集活性材料

程冬炳<sup>1</sup>, 傅正义\*<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学

活体中蛋白质活性调控具有重要的科学意义, 研究表明大部分疾病都跟蛋白质功能相关, 蛋白的表达和聚集都会影响细胞状态。目前活体中蛋白活性调控都基于分子层面, 比如改变基因从而改变蛋白结构; 设计小分子结合蛋白进而抑制活性; 泛素化标记蛋白实现降解。然而这些技术操作复杂, 还需要大规模的分子筛选才有可能得到预期效果。蛋白质固定化是将游离蛋白质封锁在一定区域内, 可以对蛋白质活性进行调控的技术。目前这门技术在溶液中提高酶催化反应效率起到了非常重要作用, 具有简单高效的优势。本课题启发于蛋白质固定化过程, 设计了一种胞内蛋白聚集活性材料, 实现了在活体中对蛋白活性的调控。

人体内的细胞代谢会产生甲醛, 在健康情况下, 细胞内甲醛的产生和消耗通常维持一个动态平衡, 维持在亚毫摩尔级别。但是当人体发生疾病如癌症等, 细胞内甲醛的动态平衡被打破, 其含量增加至原来的 2-8 倍。利用癌细胞产生的过量甲醛, 设计甲醛响应型的活性材料, 可实现选择性的诱导癌细胞蛋白聚集。具体材料由两部分构成, 一部分是甲醛响应的烯丙基胺基连接在组装多肽上, 另一部分组装多肽上连接蛋白质靶向分子。在甲醛环境中, 烯丙基胺基通过 2-aza-Cope 重排反应后生成苯甲醛, 分子疏水性增强后组装形成纳米颗粒/纳米纤维, 通过亚胺缩合反应, 将蛋白质团聚在一起, 实现目标蛋白的团聚以及细胞命运的调控

### D18-131

#### 基于仿生异质浸润表面的液体精准操控与图案化

李会增\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院化学研究所

如何精准高效地控制液体在表界面的复杂行为, 是表界面液体控制领域的重要科学问题与难点问题之一。异质浸润表面结合了亲水性区域与疏水性区域的特点, 是一类可按需设计的特殊功能性表面。该类表面兼具亲水区域对水的粘附性和疏水区域对水的排斥性, 能够协同不同浸润区域对液体的差异化作用, 在复杂、精确的液体动态行为控制方面具有显著优势, 对于先进材料加工技术、新型分析手段和高效能量收集策略的提出与发展具有重要意义。近年来, 我们围绕基于异质浸润表界面的液体精准操控与图案化开展了系统研究, 建立了表界面流体运动、界面热传导、表面能限域分子修饰及图案化电沉积等理论模型, 提出了图案对称性导向与界面粘附性导向的异质浸润表面设计原则, 发展了液滴在异质浸润表面切割、输运、旋转、回弹等动态行为的控制方法并揭示背后的机理, 实现了基于异质浸润表面液体动态调控的功能材料高精度图案化制备。研究成果发表在 *Nat. Commun.* (4 篇), *Angew. Chem. Int. Ed.*, *Sci. Adv.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, *Adv. Funct. Mater.* 等期刊, 其中 2 篇文章入选高被引论文, 研究成果被 *Science*, *Nature Asia*, *C&EN*, *New York Times*, *CGTN* 等期刊与媒体亮点报道。获授权中国发明专利 6 项, 其中 1 项已转让至上市企业。先后承担基金委重大项目、面上项目、青年基金、企业合作研发项目、北京市科技新星和中科院青促会等研究任务。

### D18-132

#### 天然纺丝机制

凌盛杰\*<sup>1</sup>

1. 上海科技大学

自然选择使得生物在漫长的演化过程中逐渐形成更适应生存环境的精巧结构, 如贝壳、虾/蟹壳、蜘蛛

丝等，这些结构一般都由简单的原料（通常为蛋白质、糖类和矿物质）在自然环境下通过多层级组装构建得到，其往往具有特定的功能性且力学性能却远优于采用繁琐合成和加工工艺制备的合成材料。其中，动物丝以其独特的温和条件下的高性能纤维成型，超低温韧性及优异的阻尼性能等而受到广泛关注。深入探究丝的力学构效关系，不仅能够为丝和丝蛋白材料的有效利用提供了理论基础，也能够为设计与制造高性能特种纤维提供了宝贵的灵感。目前，可通过采用先进表征技术（如电镜、同步辐射光源和原子力显微镜-红外光谱联用技术）对天然丝蛋白材料复杂系统进行全景表征和成像，并建立精准的、经实验验证的介观分子动力学模型，可跨尺度模拟在不同外界刺激（如应力，温度和湿度等）下材料各组分、各介观结构单元及界面的响应行为。此外，以实验表征和计算机模拟相结合的方式研究丝蛋白材料结构复杂系统的多尺度综合效应，通过多尺度分子动力学模型为天然纺丝机制的探究提供了重要的理论依据。因此，以材料的结构解析、构效关系为启发，以生物大分子纳米复合体为起点，采用“计算机辅助设计-仿生制备-功能开发”的途径从头设计和制备具有多层级有序结构的复杂智能仿生材料系统，并实现其功能化应用。

### D18-133

#### 光固化 3D 打印仿生氢键超分子水凝胶

王晓龙\*<sup>1</sup>, 吴家宇<sup>1</sup>, 朱彬<sup>1</sup>

1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室

光固化 3D 打印功能水凝胶具备优异理化性能和高精度复杂结构成形的优势，在软体驱动、能源环境、柔性电子及生物医用器械等领域具有广泛应用潜能。传统人工合成水凝胶通常具有不均匀的网络结构以及缺乏耗散机制等原因导致其普遍较差的力学性能，从而极大的限制了实际的应用范围。然而，对于光固化 3D 打印技术来说，由于聚合物网络充分形成的速率与 3D 打印快速成形过程不匹配，使得快速高精度成型制造与优异的机械性能存在着矛盾性，并且光固化打印性的水凝胶一般难以兼容传统的水凝胶强韧的设计策略。针对目前光固化 3D 打印水凝胶在生物医疗器械应用中存在成形精度低、力学性能差、生物不兼容、结构及功能性单一等瓶颈问题，受生物体中广泛的氢键作用启发，本研究以具有多重氢键相互作用的脲基水凝胶作为研究主体，构建超分子设计和可控聚合策略与光固化 3D 打印水凝胶技术相结合的基本方案，通过氢键网络调控制备了多尺度结构化超分子功能水凝胶，包括氢键 D-A 团簇结构、多重氢键缔合结构、层级梯度氢键双网络和 RAFT 介导活性氢键网络等，并系统研究了其力学、摩擦学、光学以及生物医学性能。特别地，通过不同氢键设计策略的水凝胶网络赋予其独特的功能属性，包括荧光特性、超强韧性、梯度承载和界面润滑以及活性表面，初步探索了光固化 3D 打印仿生氢键超分子水凝胶在荧光显示与检测、血管支架、医用光纤、人工关节软骨以及心脏瓣膜等方面的应用。

### D18-134

#### 仿生微纳米界面湿控材料及应用研究

郑咏梅\*<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学

受自然界生物表界面的浸润功能特性启发，设计了各种微纳米界面湿控材料，研究了仿生材料表界面的空气集水特性，防覆冰特性，以及构筑了异质图案的流体传输特性。特别是梯度界面的湿控特性，为新材料的设计提供价值的参考。设计了各种湿度环境下具有大气捕获淡水的高吸附纳米胶囊材料、MOF 基复合多孔材料、螺旋纺锤节类蜘蛛丝材料，为自然环境下材料的淡水采集应用提供价值参考。设计了各种高性能光热低温防覆冰材料，为实现材料表面的低温环境下防冰/除冰性能应用提供价值参考。

### D18-135

#### 仿生液滴超铺展及高分子薄膜制备新技术

张鹏超\*<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学

高性能高分子薄膜在国家战略新兴产业中发挥着至关重要的作用，是电池隔膜、污水处理、海水淡化等膜组件高效运行的关键。目前，高分子薄膜的规模化制备以溶液法为主，其中高分子溶液在基材表面的可控铺展是精确调控膜厚度、形貌、结构等性质的关键控制步骤，也是表界面化学领域亟待解决的基本科学问题之一。传统制膜方法，包括刮涂/流延、旋涂等，均是通过施加外力来促进液滴铺展，存在能耗高、液膜不可控等问题，在高性能薄膜理化性质精准调控方面（如超薄、多层等）存在一定局限性。因此，亟需开发高分子物薄膜制备新技术以满足国家战略新兴产业对高端膜材料的重大需求。

围绕上述重大需求，我们提出了基于限域界面液滴超铺展的高分子薄膜制备新策略。主要内容：（1）“滴液”新原理：利用液相压力和凝胶材料准液态特性的协同作用，通过构筑液/凝胶限域界面实现了液滴超铺展；（2）“滴液成膜”新技术：利用超铺展形成的均匀稳定限域液层，开发了高分子薄膜可控制备新技术；并利用液滴超铺展产生的快速剪切流体，发展了二维纳米材料快速层状有序组装新技术；实现了一系列高性能高分子薄膜的可控制备。

## D18-136

### 仿生材料中的精细结构调控

茅璞波\*<sup>1</sup>

1. 中国科学技术大学

生物利用本征特性有限的原材料，通过分级结构设计，生产出高性能的生物结构陶瓷。通过引入仿生设计原理，已在仿生结构陶瓷材料中实现了高强度和高韧性的结合。然而，仿生陶瓷中分级结构设计带来的性能改进不如生物陶瓷中明显。以珍珠层为例，尽管工程陶瓷制成的珍珠层材料的表观断裂韧性已经超过了天然珍珠层，但在排除了原材料的影响后，这一结论被推翻了。从应力强度上看，天然珍珠层的断裂韧性比其原陶瓷材料文石提高了 40 倍，而人工结构陶瓷的增韧因子则小于 10。限制陶瓷力学性能进一步提升的关键原因之一是难以调控仿生陶瓷的精细结构。与此相对，生物陶瓷的结构则被精确控制，从而实现材料性能的优化。为应对这一挑战，我们提出了一种预组装基质诱导矿化的策略用于制备仿生结构陶瓷。由于矿化过程允许对结构进行精确控制，因此该策略能够在较小尺度上调整材料结构。我们通过一些例子证明，通过这种策略，仿珍珠层陶瓷实现了精细的结构设计，从而进一步提高了其性能。

## D18-137

### 仿生多尺度结构设计制备功能新材料及其应用

魏竟江\*<sup>1,3</sup>, 傅正义\*<sup>2,3</sup>

1. 高等研究院，成都大学，成都 610106，中国

2. 材料复合新技术国家重点实验室，武汉理工大学，武汉 430070，中国

3. 湖北隆中实验室，武汉理工大学襄阳示范区，襄阳 441000，中国

摘要内容生物系统为应对环境的挑战，自然进化出了兼具优异机械性能和特殊功能的天然结构材料，如牙釉质、珍珠层、骨骼等。这些生物材料通常是由无机前驱体和有机基质自组装而成，它们的主要特征是由基本的纳微结构单元有序排列而成的多尺度分级结构，这样的结构排列除了实现机械性能的提升外，还在每一层级上也表现出性能的优化，如自修复、结构色等功能，这是目前人工合成的传统材料无法实现的。受生物体优化纳微结构的启发，仿生结构复合材料是能够实现高性能、多功能性和环境友好性的材料。氢键、共价键、离子键等相互作用力是有益于材料界面结合有利调控手段。因此，充分结合仿生多尺度结构设计的理念和层间界面耦合技术，为开发和制备具有与自然材料性能相媲美的仿生多尺度结构功能新材料提供了可能性。

关键词: 多尺度结构; 机械性能; 界面耦合; 仿生功能材料

参考文献

- [1] Jingjiang Wei, Zhengyi Fu\*, et al., *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30, 1904880.
- [2] Jingjiang Wei, Zhengyi Fu\*, et al., *Chem. Eng. J.* 2021, 424, 130549.
- [3] Jingjiang Wei, Zhengyi Fu\*, et al., *Interdiscip. Mater.* 2022, 1, 495–506.
- [4] Jingjiang Wei, Zhengyi Fu\*, et al., *Adv. Mater. Technol.* 2023, 8, 2200897.
- [5] Jingjiang Wei, Zhengyi Fu\*, et al., *Research* 2023, 6, 0164.

## D18-138

### Design and applications of superamphiphobic materials

Yanan Li (李亚楠)<sup>1</sup>

1. School of Chemical Engineering and Technology, Sun Yat-sen University

Superamphiphobic materials can repel both water and oils with different surface tension that demonstrate excellent properties of self-cleaning and anti-fouling. These properties are attractive for both the fundamental research and industrial areas, such as buildings, clothing, photovoltaic industry, or even biological applications. Typically, achieving superamphiphobicity involves designing special reentrant or overhanging topography to obtain a stable Cassie state that prevents liquids from intruding and wetting into material surfaces, even in the absence of low surface energy chemistry, but it involves sophisticated fabrication procedures and low efficiency which hinder the application of the superamphiphobic material. Therefore, design and fabrication of superamphiphobic material with applicable features such as substrate friendly, robust, scalability and low cost, is critical for the expanding the application of superamphiphobic material. Here we would introduce the recent progresses on the design and application of superamphiphobic materials in our group, including the design and fabrication of superamphiphobic material with improved strength via nanoparticle assembly via spray coating method, high transparent superamphiphobic material via the nanosphere template method, as well as the applications of the superamphiphobic material in the area of self-cleaning, anti-counterfeiting, radiative cooling materials. We hope our efforts can boost the application of superamphiphobic material in our real life.

## D18-139

### 复杂微生物代谢过程分析

袁荃\*<sup>1</sup>

1. 湖南大学

## D18-140

### 可切换光热-辐射制冷薄膜的制备及节能性能研究

徐洪波\*<sup>1</sup>

1. Harbin Institute of Technology

摘要内容建筑物的供暖和制冷需要消耗巨大的化石能源, 其消耗的能源占全球能源使用的 51% [1]。为了面对即将到来的能源危机, 极少能源消耗的智能热管理技术收到产业界、科研界的关注。太阳能热技术是将太阳光谱中的能量转换成热能, 其理论加热功率高达 933 W/m<sup>2</sup> [2]。辐射制冷技术是将热量通过中红外大气窗口辐射到外太空的无能耗冷却技术, 其理论功率为 153.1 W/m<sup>2</sup> [3]。灼热的太阳 (5800 K) 和寒冷的外层空间 (3 K) 可以分别作为理想的热源和散热的冷源, 将其用于建筑热管理能可有效降低建筑能耗。因此将光热系统与辐射冷却相结合是实现零能耗和低碳排放的理想热管理策略。我们通过顺序静电纺丝由对比聚合物纳米纤维制成的光反射层和光吸收层, 制备了原位可切换的光选择性聚合物 (PSP) 材料。所制备的 PSP 材料表现出 97.7% 的高太阳光反射率和 94.9% 的高宽带发射率, 导致辐射冷却功率 111.1

W/m<sup>2</sup>。PSP 膜的这种“冷却”状态可以通过浸渍折射率匹配液体容易地切换到“加热”状态，该折射率匹配液抑制了膜-空气界面处的散射并降低了膜的太阳带反射率。由于所设计的 PSP 膜具有高度多孔的结构，其切换时间不到 5 分钟，可实现约 95.6% 的综合太阳能吸收率，从而获得 781.6 W/m<sup>2</sup> 的估计加热功率。所进行的数值计算进一步支持了所开发的 PSP 膜在高纬度建筑热管理方面的高潜力，其节能高达 89.74 GJ m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>，并将二氧化碳排放量降至 21.69 t。

参考文献：

- [1] H. E. Murdock, D. Gibb, T. André J. L. Sawin, A. Brown, L. Ranalder, U. Collier, C. Dent, B. Epp, C. Hareesh Kumar, 2021;
- [2] P. Tao, G. Ni, C. Song, W. Shang, J. Wu, J. Zhu, G. Chen, T. Deng, Nat. Energy. 2018, 3, 1031.
- [3] a)X. Ao, B. Li, B. Zhao, M. Hu, H. Ren, H. Yang, J. Liu, J. Cao, J. Feng, Y. Yang, Z. Qi, L. Li, C. Zou, G. Pei, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A 2022, 119, 2120557119

## D18-141

### 仿生高分子动态界面粘附材料

周学昌\*<sup>1</sup>

1. 深圳大学

界面粘附，一种发生在物体表面的粘接现象，在医用胶带、芯片制造、系统集成、生物传感、人-机交互等领域发挥着关键作用。尽管国内外研究人员在界面粘附的设计和应用方面取得了不少进展，但软弹、强而可逆界面粘附材料的设计与构建，仍然受到学术界和产业界的共同关注。本报告介绍一种“超分子溶剂-聚合物”策略，通过在硬而脆且不粘的导电高分子中引入超分子溶剂，构筑了柔软且可逆粘附的导电高分子动态界面材料，并探索其作为可逆粘附电极在生物传感、生理电信号可视化集成等方面的应用。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。

## D18-142

### 仿生聚乙烯醇凝胶结构调控及其应用

雷文伟\*<sup>1</sup>

1. 燕山大学

水凝胶作为一种由大量水和三维交联聚合物网络结构组成的软材料，广泛应用于微流体器件、传感器、抗生物絮凝剂、响应涂层和组织工程等领域。大多数生物组织都是水凝胶，尤其是其表面的微/纳米结构在许多自然系统中起着非常重要的作用。受天然生物材料的启发，构建基于水凝胶材料的结构化功能表面已成为研究人员满足新型功能材料日益增长的需求的最有前途的解决方案之一。目前构筑水凝胶表面结构的制备策略主要集中在表面化学修饰、模板复制、光刻、激光扫描和 3D 打印。然而，这些方法由于制造工艺复杂，模板制作的特殊性，严重的限制了水凝胶表面结构的大面积制备和实际应用。随着人们对与复杂结构表面相关的性质越来越感兴趣，为了制备各种需要的水凝胶结构表面，一种简单且可规模化制备的方法正逐步引起人们的兴趣，也是迫切需要发展的。

本文报道了在凝胶形成过程中直接在相容性聚合物扩散层中构建微纳米结构水凝胶表面的一般策略，其依赖于聚合物链扩散和随后的冷冻诱导凝胶化和微相分离的相互作用。所提出的方法利用两个可混溶聚合物的界面，其中一个需要进行凝胶化过程。这一策略是通过两个连续的过程来实现的，即扩散驱动混合过程，然后是冷冻诱导凝胶化和微相分离的过程。前者形成扩散层，而后者在扩散层中产生结构。凝胶

化与微相分离结合,最终决定了凝胶表面上的微/纳米结构。同时,水凝胶表面的梯度结构和图案的表面结构可通过控制凝胶化温度和扩散区域来控制。更重要的是,水凝胶表面的微/纳米复合结构构成了一个复杂的开放毛细管系统,这种结构可以自发的诱导液体抗重力运输同时也表明其在水凝胶抗脱水、界面光热蒸发及污水处理等方面有潜在的应用。

## D18-143

### 仿生表面图案化技术助力功能微器件的开发与应用

冯文骞\*<sup>1</sup>

1. 四川大学

具有区域功能化的多孔薄膜器件在生物技术、诊断应用、柔性穿戴器件、微化学合成分析以及电路制备等方面具有广泛的应用。特别是针对活细胞高通量筛选的多孔聚合物薄膜器件,对于有效药物的发现、理解细胞进程的研究、以及推进个性化药物的安全检测至关重要。本研究将系统报道基于高分子聚合相分离而单步制备具有化学反应性超疏水表面的方法,并可通过氨基取代[1]或者表面引发原子转移自由基加成聚合反应[2]对超疏水表面进行化学改性或分子接枝,最终实现器件表面的定制功能化。同时,这些化学过程可通过可见光进行空间与时间的良好控制,结合无掩膜光刻系统,轻松实现对超疏水表面上功能分子,如药物分子,的位置、种类和密度的调节。利用光触发药物递送系统远程控制,药物分子可从固体表面释放,从而以无机械干扰的形式将特定的药物分子添加于细胞培养环境,实现在不同时间点向数千个液滴平行进行程序性的药物添加[3]。利用图案化技术,同时也实现了在薄膜器件上的微流道以及微液滴形式的迷你化反应单元[4],提升了化学检验效率,将该类器件向自动化学合成反向推进。

参考文献

[1] Xie X.; Feng W\*. *Angew. Chem.* 2023, e202302837

[2] Xie X.; Chen X.; Levkin P.; and Feng W\*. *Adv. Mater.* 2022, 34: 2203619.

[3] Zhao Y.; Sun Y.; Xie X.; Liang Y.; Cavalcanti-Adam E.A.; and Feng W\*. *Adv. Mater.* 2024, 36: 2306814

[4] Xie X.; Xu Z.; Yu X.; Jiang H.; Li H.;\* Feng W\*. *Nat. Commun.* 2023,14: 4289.

## D18-144

### 光活性仿生智能细胞支架材料

杜鑫\*<sup>1</sup>, 顾忠泽<sup>1</sup>

1. 东南大学

构建体外细胞培养装置,复现人体内细胞、组织和器官的生理及病理状态,为生命科学、新药研发、精准医疗提供研究模型,是前沿科学中的热点研究方向。人体具有跨尺度的结构特征与异质性,以及不间断的动态变化与自我重构特征,而现有的人工细胞支架材料难以模拟上述特点,致使现有的细胞培养装置无法对细胞生长进行区域化的精准引导。为了解决这个挑战,我们发展了光活性智能细胞支架材料,通过结合可逆光化学反应和光子晶体材料,制备出了同时具有异质性与动态特征,并可自反馈其性质变化的光活性智能细胞支架材料,实现了人工细胞支架参数的原位、区域化光控调节与测量,从而可以构建出高度复杂的仿生微环境。我们还进一步发展了智能细胞支架的高精度三维微加工技术,为其赋予高精度的仿生结构。这些材料与技术为进一步营造高仿生微环境,发展新一代的细胞培养装置奠定了基础。

**D18-145****仿生低粘附界面材料及液体多行为操纵**衡利苹\*<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学

液滴的非接触多行为操纵（驱动、传输、旋转、分裂、分配等）在材料合成、精细化学、细胞培养、计量化学、病理检测、微流体芯片及能量收集等领域都有重要的应用前景。现有的液滴操纵策略，大多是基于低粘附超浸润界面的外场作用下液滴的驱动与传输调控；然而除了基本的运动控制，液滴的精准分裂定量是实现有限样品多次检测和高通量筛选的基础，是新一代智能微流控芯片的关键要素。与简单的液滴驱动和传输不同，实现液滴的分裂，除了基底和液滴之间的接触线摩擦外，施加的外部刺激必须克服液滴的内聚能和表面张力，也就是说液滴的分裂是实现液滴非接触多行为操控的难点和关键环节。本项目针对上述难题，设计了系列智能低粘附界面，实现了液体的快速长距离传输及外场作用下的精准定量分裂[1-3]，分配，驱动，旋转等多行为操纵，并利用液滴的多行为操控设计了界面化学反应及微流体检测芯片[4-5]。

参考文献

- [1] Han, X.; Heng, L. P.\*; Jiang, L. *Adv. Mater.*, 2024, 2402779
- [2] Han, X.; Heng, L. P.\*; Jiang, L. *Adv. Mater.*, 2024, 2311729.
- [3] Tan, S. D.; Jiang, L.; Heng, L. P. \* *ACS Nano*, 2024, 18, 8484-8495.
- [4] Han, X.; Jiang, L.; Heng, L. P.\*; *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145, 6420-6427
- [5] Sun, Y.; Jiang, L.; Heng, L. P. \* *ACS Nano*, 2023, 17, 12616-12628

**D18-146****仿生分子自组装：从结构功能材料到活性智能系统**刘凯\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院深圳先进技术研究院

在化学自组装中引入类生命活性是推动其复杂化发展的重要方向。单一组分的静态自组装存在结构时空操控性不强的科学瓶颈，难以实现复杂的生物性质与功能。为此，我们提出了多组分（动态）网络化的组装策略，自下而上构筑了一系列类生命组装系统，突破了平衡自组装与非平衡自组装间的界限。主要成果包括：（1）通过色素和寡肽/氨基酸生物小分子的协同共组装，模拟自然光合系统中的有序纳微结构，增强太阳能的利用效率，在光催化产氢、产氧，氧化反应和辅酶再生中取得良好的应用效果；（2）利用肽复制子纤维激活光敏氧化反应，加速巯基单体的氧化，正反馈调控了二硫键大环肽的合成组装，实现了简单代谢和自我复制的整合。通过调节氧化程度，构筑了多样的自复制组装路径。在开放的流体系统中，施加选择压力，建立动态稳态。通过控制光照强度，使复制子既能以光催化改变体系的氧化程度，又能以突变适应这种改变，表现出生态进化动力学特征；（3）通过调节耗散反应的速率，控制组装动态和通讯行为，将耗散组装和马尔戈尼效应自组织整合起来，构建了一个具有能量代谢功能的活性液滴系统，实现了耗散组装中能量的贮存和利用。仿生分子自组装有助于深化对生物现象的理解，并有望为制造智能材料与系统提供有效策略。

**D18-147****基于嵌段聚合物多尺度相分离的仿生软物质**郎超\*<sup>1</sup>, 蔺洋洋<sup>1</sup>, 魏宏鑫<sup>1</sup>, 吴蓓<sup>1</sup>, 刘子奇<sup>1</sup>, 朱玉婷<sup>1</sup>, 袁浩轩<sup>1</sup>

1. 华南理工大学

利用人工合成的软物质模拟生命体系的结构和功能，一方面能透过复杂生命现象探寻本质性的规律，如离子的高选择性传输、生物能量的高效利用等；另一方面可以开发出性能类似甚至超越天然物质的合成材料。我们通过借鉴蛋白分子、细胞膜结构以及生物组织等不同尺度上的生命体系模型，发展了自下而上合成功能性仿生软物质材料的新策略。比如，通过借鉴天然通道蛋白，我们设计开发了基于刷状嵌段聚合物骨架的人工离子通道，可以实现高选择性和高活性的跨膜离子传输。以天然生物组织的多尺度结构为灵感，我们利用嵌段聚合物在非平衡态下的自组装，开发了可规模化制备、机械性能优异、可回收的结构仿生水凝胶。这种“快速注射”水凝胶具有类似天然材料的多层级结构，其在微米尺度上呈现蜂窝网状结构，在纳米尺度上呈现无序球状结构，表现出类似于蝴蝶翅膀的结构色现象。除了静态性质，我们还模拟肌肉等动态生物体系，开发能够对环境刺激进行快速响应的人工材料。采用类似肌原纤维的交替单元设计，我们通过对具有高力学性能的水凝胶纤维进行应变诱导结晶，制备了具有高取向性仿生微纳结构的人工肌肉纤维，实现了高性能的多模式致动。

## D18-148

### 仿生微界面的能质转换与传递

李猛\*<sup>1</sup>

#### 1. Chongqing University

新能源转换及储存系统中的界面问题是一些光、电化学能源器件或装置的核心问题，例如二次电池中的电极/电解质界面电荷传递及界面反应、能源催化中的气/液/固相界面电荷及离子传输机制及表界面工程、太阳能光/热/电转换中的界面转换、分离、传输及复合机制等。自然界中存在丰富的界面现象，能够在温和的条件下、最低的能耗下以及有限的材料选择范围内的实现精巧的多功能界面调控。报告人近年来尝试自然学习的仿生思路解决新能源转化及储存过程中的界面问题，通过新能源利用中关键材料的仿生设计和器件内部能质传递与转换的协同方法这两方面开展了系列研究工作，采用材料与工程热物理学交叉的研究方法，发展了多尺度碳基材料的可控制备及其功能电极的调制，探讨了碳基材料的仿生策略与“功能仿生”作用机理，尝试了材料仿生设计与内部能质传递与转换协同的研究方法。

## D18-149

### 增强水滴在高速运动超疏水基底上的沉积

宋美荣\*<sup>1</sup>

#### 1. 河南农业大学

增强水相液滴在超疏水表面上的沉积行为对农药喷洒，喷墨打印等应用有重要意义。目前静止超疏水表面上使液滴沉积的助剂较多，但这些助剂均不能让水滴沉积在高速运动的超疏水表面上。水滴在高速运动超疏水基底上呈现气球-线状撞击动力学，这种撞击动力学不仅在横向和纵向不对称，而且在上游和下游不对称，高度不对称性导致水相液滴快速脱离基底，接触时间大幅度减少 (> 63%)。本工作通过向油相液滴如乙醇和石蜡在高速运动基底上的沉积行为学习，在水相中添加二元复合助剂，表面活性剂二(2-乙基己基)琥珀酸酯磺酸钠 (AOT) 和聚合物聚乙烯醇 (PEG) 复合助剂，实现改变水相液滴理化性质使其完全沉积的效果。发现了液滴由最初撞击时的气球状动力学演变为四种撞击特征截然不同的撞击动力学：气球-线状断裂不沉积、气球-铅笔状部分沉积、丝状不沉积和纺锤状完全沉积。我们通过统计特征信息，推演撞击过程、分析空气卷入的临界速度等揭示了四种撞击动力学形成的过程和液滴在高速运动超疏水基底上难以沉积和实现沉积的机理，发现增加粘度和降低表面张力可降低液滴撞击形态的不对称性，动态接触角对沉积至关重要。最后模仿无人机喷洒时，喷雾液滴和叶片之间即使存在很大的相对水平运动速度，液滴的

沉积率也可以得到大幅度提高。该工作为揭示液滴在高速运动超疏水基底的各种撞击动力学形成过程、沉积机理等方面提供了基础数据和理论指导，也为研究具有相对水平运动的液固撞击行为提供了一种新的思路。

## D18-150

### 具有自适应压力稳定性和粘附性的仿生超疏水表面

邵慧娟<sup>1</sup>，王德辉\*<sup>1</sup>，邓旭<sup>1</sup>

1. 电子科技大学基础与前沿研究院

超疏水表面具有水下减阻和固-液低粘附的特性。然而，在传统超疏水表面的设计中，很难同时实现气-液界面的高稳定性和低粘附性。本工作基于水生植物大藻（*Pistia stratiotes*）能长期漂浮在水面并保持稳定的水下超疏水状态的特性，通过模仿其叶片绒毛的结构并进行水下浸润原理分析，我们发现大藻叶片绒毛的类单凹特征和自适应形变对其水下抗压性能的协同作用：类单凹结构增强了临界抗压能力，促进了结构的形变；通过形变使固-液接触面积成倍增加，从而提高了表面的抗水压性能。动态粘附力测试证实了仿生大藻叶片绒毛表面能够实现自适应形变增强抗压能力，同时当液体脱离表面时维持较低的粘附力。我们进一步制备了仿大藻微纳复合超疏水表面，测试结果表明其具有优异的抗静水压性能，能够承受相当于水下 9 m 深处的水压。与传统的超疏水表面相比，仿大藻超疏水表面在抵抗动态水压方面展现出更优异的性能，能够承载高达 0.34 MPa 气压驱动的水冲击。该自适应压力稳定性和低粘附性的仿生超疏水材料，有望为两栖飞机提供滑行减阻方案，同时克服起飞脱离水面时的液体粘附难题。

## D18-151

### 光促多离子相互作用增强废水盐差发电

夏家香<sup>1</sup>，高军\*<sup>1,2</sup>，刘学丽<sup>3</sup>

1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所

2. 山东能源研究院

3. 青岛大学

生物离子通道多个离子在通道内部的动态调控对维持细胞内外离子浓度和电位的稳定至关重要。依赖于离子的大小、电荷和通道的特定氨基酸基团，这些通道能够选择性地允许特定离子通过，同时排斥其他离子。离子通过通道时会出现竞争和协同效应，这些效应可以影响离子的传输速度和通道的选择性。基于此，我们设计了具有亚纳米级层间距及光热响应特性的二维 MXene 层状膜材料，并提出一种埃流通道内光促多离子相互作用策略，用以实现高通量高选择性的钠离子传输。

分子动力学模拟揭示，多离子相互作用是这一现象的内在机制，而该机制正是生物离子通道高效传输目标离子、实现其生理功能的关键策略之一。由于 MXene 的光热效应，受光照后更多目标离子（Na<sup>+</sup>）进入通道内，传输速率提高。而进入的 Na<sup>+</sup>越多，通道外其他带正电的竞争离子所受静电排斥作用就越强，使得竞争离子传输阻力越大，导致竞争离子渗透受到进一步抑制，从而同时提升了目标离子传输的通量及选择性。基于上述结果，进一步将 MXene 层状膜应用于光促废水盐差发电，通过调节膜两侧盐溶液浓度梯度，功率密度可达 19 W m<sup>-2</sup>，同时避免了废水中重金属离子的渗透及对另一侧清洁水源的污染。

参考文献

J.X.Xia, et al., Light-Augmented Multi-ion Interaction in MXene Membrane for Simultaneous Water Treatment and Osmotic Power Generation. ACS Nano. 2023, 17, 24, 25269-25278.

**D18-152****Soft-cone-assisted rolling robot with tailed wettability for gastrointestinal tract delivery**Shenglin Yang\*<sup>1</sup>

1. GuangXi university

Miniature soft robots have evolved into various therapeutic applications due to good adaptability.[1-3] Nonetheless, the lumen surface inside body generally possesses lots of mucus (non-Newtonian liquid) and plicae gastricae obstacles, which cause large adhesion force and greatly hamper the movement of the robot, making the remote navigation of robots across complex and dynamic environments challenging.

To address the challenge, here a design inspiration is derived from sea urchins, known for their rolling behaviors to navigate and surmount obstacles. The soft-cone-assisted rolling robot (SCARBot) was fabricated and sealed with blood coagulation gel, creating a hollow cylindrical structure with drug pills loaded inside. The arrangement of an array of soft cones with manually designed surface wettability allows for controlled locomotion of the robots, significantly reducing surface friction and improving environmental adaptability. Under magnetothermal conditions, the drug-loaded blood coagulation gel carried by the robot melts, releasing drugs at the desired location. In conjunction with the magnetothermal heating effect, this robot demonstrates enhanced antibacterial efficiency, validated by US-imaging-guided navigation in an ex vivo GI stomach and duodenum. Such soft robots with exceptional environmental adaptability and mobility offer high potential for targeted delivery through lumens inside body.

1. M. Sitti, Nat. Rev. Mater. 2018, 3, 74.
2. X. Zhao, Y. Kim, Nature 2019, 575, 58.
3. Y. Kim, GA. Parada, S. Liu, X. Zhao, Sci. Robot. 2019, 4, eaax7329.

**D18-153****生物矿化启示的低温制备高硬度和高断裂强度的文石块体材料**胡辉冯<sup>1</sup>, 汪琦航<sup>1</sup>, 傅正义<sup>1</sup>, 邹朝勇\*<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学

致密陶瓷通常在高于 1000 °C 的温度下经过粉末烧结得到。相比之下,生物体可以在温和的条件下使用无定形前驱体产生生物矿物。此外,生物矿物的高密度赋予其高硬度,而它们的多级结构也增强了它们的断裂韧性。我们通过原位结晶和致密化无定形碳酸钙 (ACC),在低温 (80 °C) 下制备了由致密纳米晶体组成的文石陶瓷。硬度和弹性模量可分别达到 3.2 GPa 和 65.6 GPa。深入探讨了相应的致密化和结晶机理,并强调了水在纳米颗粒融合和 ACC 结晶过程中起着关键作用。我们进一步以 ACC 和纤维素纳米纤维为原料,通过原位结晶制备了仿贝壳珍珠层块体材料。该材料的硬度达到 3.8 GPa,模量达到 70 GPa,抗弯强度为 160 MPa,明显高于以往的研究报道,与天然贝壳珍珠层相当。因此,我们的研究为低温制备致密陶瓷提供了新的策略和思路。

**D18-154****蜂窝结构启发的雾度可调的耐磨透明超疏水涂层**李航\*<sup>1</sup>, 武利民<sup>1</sup>, 周树学<sup>1</sup>

1. 复旦大学

透明超疏水涂层具有优异的自清洁性能,尤其适合应用于户外光伏显示屏、太阳能发电和窗户等领域。然而,超疏水涂层所需的微纳米结构导致其耐磨性和光学性质不佳,因此透明超疏水涂层的实际应用仍面

临巨大挑战。在此，我们通过 PDMS 模板法在环氧树脂基底上制造蜂窝状结构，然后在环氧树脂半固化时喷涂疏水性 SiO<sub>2</sub> 纳米粒子，氟化后制备得到同时具有高透明度、耐磨性和超疏水性的蜂窝状结构涂层。通过调节蜂窝结构，可以实现涂层的雾度在 8.9-54.1% 可调，且不同蜂窝结构的涂层平均透光率为 90.0%，这使得它可以满足不同场景对透明超疏水涂层的雾度需求。此外，蜂窝结构的坚硬环氧树脂以及树脂和疏水性 SiO<sub>2</sub> 纳米粒子的强附着力保证了涂层在经过剧烈的机械磨损和室外放置后仍能保持超疏水性，有着很好的实际应用潜力。

## D18-155

### 骨膜-骨启发的仿生异质压电支架用于骨缺损修复研究

赵耀<sup>1</sup>，蔡云帆<sup>1</sup>，王文凯<sup>1</sup>，牛丽娜\*<sup>1</sup>

1. 第四军医大学第三附属医院

#### 1. 引言

神经血管化不足是临界尺寸骨缺损修复面临的重大挑战。骨膜是一种独特的压电生物材料，富含神经和血管网络，在成骨过程中发挥着关键作用。然而，传统的人造骨支架通常只模拟了骨基质的特征，却忽略了骨膜对骨愈合的重要贡献。鉴于此，启发于骨膜-骨的自然结构及功能，本文拟仿生设计一种新型的双层骨支架用于临界尺寸的缺损骨再生，并系统研究支架结构组成及内源性压电刺激诱导骨再生的作用机制。

#### 2. 材料和方法

首先利用仿生矿化法及冷冻干燥技术构建羟基磷灰石杂化的壳聚糖类骨微纳多级孔隙结构支架（类骨基质）；随后将化学沉淀法得到的白磷钙石压电粒子与双键改性的明胶及海藻酸钠复合滴加于下层类骨基质层表面，通过光固化及离子螯合作用在类骨基质层表面原位形成双网络凝胶层（类骨膜基质），从而制备得到仿生骨膜-骨支架。

#### 3. 结果

1)、启发于骨膜-骨组织天然结构，上层水凝胶（类骨膜层）与下层矿化多孔支架（类骨质层）形成了强健的过渡性嵌合界面，这种两相界面类似于天然骨组织中夏贝氏纤维将骨膜与骨质相互连接模式；

2)、仿生支架的下层矿化层具有类骨的三维多级孔隙结构，而且纤维网络中原位结晶生长出类骨无机组成的羟基磷灰石纳米粒子；上层双网络水凝胶层具有优异的压电特性及类骨膜基质的粘弹性，凝胶中可控释放的 Mg<sup>2+</sup> 协同压电刺激可显著增强传统支架神经-血管化生成潜力；

3)、仿生支架在超声辅助的压电刺激下，通过激活 PI3K-AKT、HIF-1、ATP、MAPK 和 Ca<sup>2+</sup> 信号通路促进干细胞成骨、成血管及成神经分化，进而实现神经-血管化骨再生。

#### 4. 结论

通过模仿天然骨膜-骨的结构及功能，本文成功设计得到一种新型的仿生异质结构骨支架，这种仿生支架通过重建骨膜及骨缺损环境，利用其独特的压电性和活性组成显著促进神经-血管化的缺损骨再生。

#### 参考文献

[1] K. C. P. Cheung, S. Fanti, C. Mauro, G. et al., Nat. Commun. 2020, 11, 3595.

[2] Z. Liu, X. Wan, Z. L. Wang, L. Li, Adv. Mater. 2021, 33, 2007429.

#### 致谢

感谢国家重点研发计划（2022YFC2405900）及国家自然科学基金（82325012）项目支持。

## D18-156

### 基于“L-Arg-ROS-NO”级联反应的微环境智能响应型水凝胶促进心肌梗死修复

刘帅<sup>1</sup>，陈宇<sup>1</sup>，侯鸿浩\*<sup>1</sup>

1. 南方医科大学

由心肌梗死引起的心血管疾病已成为全球范围内死亡率最高的人类健康“杀手”之一，对心肌梗死的预防和治疗是一个世界性难题。生物材料构建的微环境与宿主局部微环境之间的动态交互作用直接影响组织

修复的进程与效果, 我们拟开发一种负载 L-精氨酸的微环境响应型水凝胶, 通过“L-Arg-ROS-NO”生物级联反应实现 ROS 清除、抑制炎症以及促进血管生成, 从而促进心肌梗死修复。体外细胞实验结果证明这种水凝胶能够在清除 ROS 的同时释放 NO, 促进脐静脉细胞成管。动物实验结果则显示经负载 L-精氨酸的水凝胶治疗后, 心梗大鼠症状明显减轻, 心室壁厚度增加, 射血分数等指标也有明显提高。免疫荧光染色结果表明实验组的炎症反应明显减少, 新生血管增多。上述结果显示这种水凝胶对大鼠心肌梗死有明显的治疗作用, 是一种十分具有潜力的心肌组织工程材料。

## D18-157

### 稳定的即贴即用型仿生光热防冰薄膜

夏小虎<sup>1</sup>, 张亚斌\*<sup>1</sup>

1. 广西大学

广泛发生的结冰现象给人类生产和生活带来了诸多不便, 同时造成了各种设施设备的损坏, 甚至对人类的生命安全起到潜在的威胁。传统的防冰技术大多基于主动保护概念, 采用外部能量输入, 需要大量能源, 并存在破坏原有设施的风险且缺乏时效性。受高纬度地区具有抗冰能力的生物启发, 基于延迟结冰和减少冰附着的机制, 研究人员构建了各种仿生微/纳米结构表面以被动抵御冰层形成。然而, 仅依靠构建表面结构已被证明无法完全消除表面的结冰现象, 结合了被动与主动防冰策略被认为是更有前景的方案, 例如光热性能与微/纳米结构在防冰场景中的协同作用[1-3]。因此, 为满足频繁出现的结冰天气等应用场景需求, 探索新型复合防冰表面势在必行。

结合主动光热除冰和被动超疏水防冰的概念, 我们提出了一种具有贴即用功能的定制光热防冰膜, 可用于实现如露天的载具座椅和汽车车身等局部位置的快速防冰。结合微米级多孔硅藻土的骨架结构与纳米级蜡烛烟灰的光热能力和疏水性, 制备了兼备光热性、疏水性和鲁棒性的微单元。使用这种微单元制备的 PDMS 薄膜具有良好的疏水性 (162.4°) 和光热能力 (84.1°C)。由于硅藻土的骨架作用, 即使在表面磨损后, 薄膜仍具有良好的防冰和除冰能力。同时硅藻土的绝热能力显著改变了光热转换过程中的传热机制, 从而使其具有优异的光热性能。另一方面, 基于微结构生物模板使制备的复合薄膜具有粘附性能, 可粘附于玻璃、金属、皮革、聚合物等多种表面。这种功能薄膜可以通过简单的动作粘附在自行车座椅表面或车体上, 使普通表面不结冰, 也可以快速拆卸更换, 在日常生活中的防结冰和除冰方面有很大的应用前景。

## D18-158

### 荷叶启发的可持续多功能 Janus 膜用于食品包装

马正欣<sup>1</sup>, 丁春梅\*<sup>1</sup>, 李建树<sup>1</sup>

1. 四川大学

内容作为石油基聚合物的替代品, 适用于多变环境的多功能可持续包装材料需求量很大。大豆多糖 (SPS) 具有显著的抗氧化和成膜性能, 是可持续包装材料的理想候选材料。然而, SPS 较差的耐水性和机械性能阻碍了其进一步应用。受荷叶 Janus 结构的启发, 我们开发了一种不对称多功能包装膜, 保留 SPS 优点的同时, 解决了 SPS 存在的问题。具体来说, 我们将 SPS 稳定的银纳米粒子与明胶和蜂蜡结合在一起, 增强了薄膜的机械性能和耐水性。此外, 还用棕榈蜡在薄膜的表面制备分层微/纳米结构, 类似于天然荷叶的上表面。这种 Janus 薄膜具有出色的防水性能, 优于迄今报道的其他基于 SPS 的材料。此外, 它还具有优异的抗菌活性 (大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率大于 95%)、抗氧化性能 (增强 2 倍) 和紫外线阻隔性能 (波长为 200~400 nm 约为 100%)。凭借这些出色的性能, 所制成的薄膜能够成功地应用于食品包装, 在肉类和水果保鲜中得到了验证。这种生物仿生策略为制造可持续的高性能食品包装提供了参考。

参考文献:

[1] Z. Ma, C. Ding, J. Li, et al., Lotus leaf inspired sustainable and multifunctional Janus film for food

packaging. Chem. Eng. J, 2023, 457, 141279.

[2] H. Jiang, S. Zhao, Z. Li, et al., Swan-feathers inspired smart-responsive sustainable carboxymethyl cellulose/polyvinyl alcohol based food packaging film for robustly integrated Intelligent and Active Packaging. Nano Today, 2024, 56, 102272.

## D18-159

### 电水凝胶介导种植体周神经生长促进骨结合与骨感知的双重效应及机制研究

秦雯<sup>1</sup>, 牛雯<sup>1</sup>, 李玲<sup>1</sup>, 牛丽娜\*<sup>1</sup>

1. 空军军医大学第三附属医院

背景：种植牙已被广泛应用于口腔牙列缺损的修复。然而目前种植失败的主要原因包括骨结合不足，和种植体骨感知能力不足引起的种植体长期过载。大量研究显示，种植体周围神经是种植体骨结合和骨感知的关键要素，而导电材料是目前神经再生的潜在方法之一。

目的：通过构建一种新型可注射导电水凝胶，促进种植体周神经再生，进一步介导种植体骨结合与骨感知的增强。

方法：该新型 GMPA 导电水凝胶由负载导电聚合物聚吡咯的 GelMA 与氧化透明质酸通过席夫碱反应和静电相互作用形成，具有良好的可注射性和自愈合性，兼具良好的导电性能。GMPA 水凝胶能够促进神经细胞迁移及轴突生长，并进一步介导神经细胞分泌成骨神经肽促进成骨细胞的成骨分化，转录组测序结果显示该机制可能与钙离子通道开放及下游通路磷酸化相关。体内实验证实 GMPA 水凝胶能够有效促进种植体周围神经再生，从而介导种植体骨结合与骨感知的增强。

结论：本文构建的 GMPA 导电水凝胶通过促进钙离子通道开放及下游通路磷酸化促进种植体周神经再生，进一步介导种植体骨结合与骨感知的增强。

## D18-160

### 核酸稳定无定形磷酸钙介导胶原矿化对生理及病理性矿化的启示

雷晨<sup>1</sup>, 牛丽娜\*<sup>1</sup>

1. 口腔系统重建与再生全国重点实验室，国家口腔疾病临床医学研究中心，陕西省口腔医学重点实验室，第四军医大学口腔医院修复科

胶原纤维内矿化是牙、骨等硬组织优异力学性能和生物学功能发挥的重要结构学基础，其中胶原纤维、无定形磷酸钙矿化前体(Amorphous calcium phosphate, ACP)和非胶原蛋白(Non-collagenous proteins, NCP)一直被认为是完成纤维内矿化的三个核心要素。带有聚阴离子性质的 NCP 一方面可稳定 ACP 以提供胶原矿化原料，一方面修饰胶原蛋白以调控纤维内矿化的形成，是调控整个矿化过程的关键。但是，近年来越来越多的研究表明，除 NCP 外，仍有我们未发现的天然生物分子在生物矿化的调控中发挥重要作用。核酸作为天然的聚阴离子，理论上具有极强的稳定钙磷离子、形成 ACP 并促进基质矿化的作用，但却从未得到证实。那么，核酸在生物矿化中的作用是否一直都受到了忽略？核酸是否具有调控矿物形成及基质矿化的功能呢？其生物学意义又是什么呢？

针对上述问题，本研究通过体外仿生矿化手段同步联合多种新型表征技术探究核酸对 ACP 的稳定作用及稳定机理，并结合仿生矿化理念进一步探究核酸稳定的 ACP(核酸-ACP)对胶原纤维内矿化的作用及矿化机制。基于上述核酸调控矿化的新功能，我们深入探究了核酸调控生物矿化过程中的两个重要生物学问题：即 DNA-ACP 促进病理性钙化发生的新机制及 RNA-ACP 在硬组织修复再生中的新运用。

研究结果表明，核酸不仅具有稳定过饱和钙磷溶液形成 ACP、调控矿物形成及晶体转化的作用，同

时具有高效诱导胶原纤维内矿化的功能。在此原创性机理的指导下，本研究首次发现了 DNA 诱导病理性钙化形成的新机制，并通过调控 DNA 的降解，阻断了胶原及细胞外基质的矿化，为病理性钙化疾病的防治提供了作用靶点。此外，基于 RNA 作为矿化诱导剂具备快速矿化胶原纤维的功能及优异的矿化可控特性，本研究首次制备出了具有可控矿化功能的 RNA-ACP 复合胶原支架材料，并阐明了其在骨缺损修复中的优异效果及相关机制，为智能化硬组织缺损修复材料的研发提供了新策略。以上研究打开了生物矿化的一个崭新领域，既为核酸参与生物矿化提出了新机制，又为病理性钙化相关疾病的阻断及硬组织缺损修复材料的研发提供了新策略。

## D18-161

### Bio-inspired Double Angstrom-Scale Confinement for Ultrahigh Osmotic Power Generation

Chao Liu<sup>1</sup>, Anqi Ni<sup>1</sup>, Guoxiu Wang<sup>2</sup>, Pan Xiong<sup>1</sup>, Junwu Zhu\*<sup>1</sup>

1. Nanjing University of Science and Technology

2. University of Technology Sydney

Osmotic power, a clean energy source, can be harvested from the salinity difference between seawater and river water. However, the output power densities are hampered by the tradeoff between ion selectivity and ion permeability. Here we propose an effective strategy of double angstrom-scale confinement (DAC) to design ion-permselective channels with enhanced ion selectivity and permeability simultaneously. The fabricated DAC-Ti<sub>0.87</sub>O<sub>2</sub> membranes possess both Ti atomic vacancies and an interlayer free spacing of  $\sim 2.2\text{\AA}$ , which not only generates a profitable confinement effect for Na<sup>+</sup> ions to enable high ion selectivity but also induces a strong interaction with Na<sup>+</sup> ions to benefit high ion permeability. Consequently, when applied to osmotic power generation, the DAC-Ti<sub>0.87</sub>O<sub>2</sub> membranes achieved an ultrahigh power density of 17.8 W m<sup>-2</sup> by mixing 0.5/0.01M NaCl solution and up to 114.2 W m<sup>-2</sup> with a 500-fold salinity gradient, far exceeding all the reported macroscopic-scale membranes. This work highlights the potential of the construction of DAC ion-permselective channels for two-dimensional materials in high-performance nanofluidic energy systems.

#### References:

[1] Liu, C.1; Ye, C.1; Zhang, T.; Tang, J.; Mao, K.; Chen, L.; Xue, L.; Sun, J.; Zhang, W.; Wang, X.; Xiong, P.; Wang, G.; Zhu, J., Bio-inspired double angstrom-scale confinement in Ti-deficient Ti<sub>0.87</sub>O<sub>2</sub> nanosheet membranes for ultrahigh-performance osmotic power generation. *Angewandte Chemie International Edition* 2024, 63 (4), e202315947.

[2] Liu, C.1; Ye, C.1; Wu, Y.; Liu, Y.; Liu, Z.; Chen, Z.; Ma, R.; Sakai, N.; Xue, L.; Sun, J.; Zhang, W.; Zhang, W.; Wang, X.; Sasaki, T.; Xiong, P.; Zhu, J., Atomic-scale engineering of cation vacancies in two-dimensional unilamellar metal oxide nanosheets for electricity generation from water evaporation. *Nano Energy* 2023, 110, 108348.

[3] Liu, C.1; Liu, Y.1; Ma, R.; Sasaki, T.; Wang, X.; Xiong, P.; Zhu, J., Atomic cation-vacancy engineering of two-dimensional nanosheets for energy-related applications. *Materials Chemistry Frontiers* 2023, 7 (6), 1004-1024.

[4] Liu, Z.1; Liu, C.1; Ni, A.; Mao, K.; Chen, L.; Xue, L.; Sun, J.; Wang, X.; Xiong, P.; Zhu, J., Tortuosity regulation of two-dimensional nanofluidic films for water evaporation-induced electricity generation. *Nano Research* 2024, <https://doi.org/10.1007/s12274-024-6642-1>.

[5] Liu, Z.1; Liu, C.1; Chen, Z.1; Huang, H.; Liu, Y.; Xue, L.; Sun, J.; Wang, X.; Xiong, P.; Zhu, J., Recent advances in two-dimensional materials for hydrovoltaic energy technology. *Exploration* 2023, 3 (2), 20220061.

[6] Huang, H.1; Liu, C.1; Liu, Z.1; Wu, Y.; Liu, Y.; Fan, J.; Zhang, G.; Xiong, P.; Zhu, J., Functional inorganic additives in composite solid-state electrolytes for flexible lithium metal batteries. *Advanced Powder Materials* 2024, 3 (1), 100141.

## D18-162

## 仿生策略调控电极-电解液界面实现高效水系锌离子电池

张思达<sup>1</sup>, 苟倩志<sup>1</sup>, 郑玉杰<sup>1</sup>, 李猛\*<sup>1</sup>, 陈伟根<sup>1</sup>

1. 重庆大学

摘要内容近年来, 水系锌离子储能器件得到了广泛的研究。它具有无毒、不易燃、高离子电导率、成本低、理论比容量高(820 mA h/g)等优点。但是, 由于电极-电解液界面的热力学不稳定和动力学缓慢, 锌离子电池易受到水合离子脱溶能量势垒、枝晶生长和电极溶解等副反应的影响, 导致其可逆性较差和电池寿命有限。在生物领域, 生物体的细胞内外也存在物质的交换与输运行为。在这一过程中, 生物体仅需消耗少许的能量, 便能实现物质的高效稳定输运。因此, 我们将细胞的独特功能迁移到电池领域, 受到细胞膜跨膜输运特性和多糖细胞膜上的受体和配体相互作用启发, 从电解液调控策略出发, 调控电极-电解液界面, 实现高性能水系锌离子电池的设计。

为此, 我们利用羟基与  $Zn^{2+}$  的高亲和性, 将地衣中衍生的多糖分子赤藓糖醇(Ert)作为功能电解质添加剂加入到  $ZnSO_4$  电解液中。实验和理论计算结果表明, Ert 添加剂对  $Zn^{2+}$  具有较强的吸附能, 并通过定向重构氢键网络进而重塑  $[Zn(H_2O)]_6^{2+}$  溶剂化结构。此外, Ert 添加剂也优先吸附锌负极表面, 构建一个动态热力学稳定的界面, 降低静电相互作用, 加速反应动力学。利用上述策略, 在  $1\text{ mA cm}^{-2}$  和  $1\text{ mA h cm}^{-2}$  条件下,  $Zn||Zn$  对称电池在含有 Ert 的添加剂的电解液中可以稳定循环 2000 小时, 在  $5\text{ mA cm}^{-2}$  和  $2\text{ mA h cm}^{-2}$  可以稳定循环 2400 小时。此外, 组成的  $Zn||MnO_2$  在纽扣电池和低 NP 比下的软包电池中均表现出优秀的倍率性能和循环性能, 为实现高性能可逆性锌离子储能器件开发提供了一些新的参考。

## 相关参考文献

[1] Gou, Q.; Luo, H.; Zheng, Y.; Zhang, Q.; Li, C.; Wang, J.; Odunmbaku, O.; Zheng, J.; Xue, J.; Sun, K.; Li, M. *Small*. 2022, 18(24): 2201732.

[2] Gou, Q.; Luo, H.; Zhang, Q.; Deng, J.; Zhao, R.; Odunmbaku, O.; Wang, L.; Li, L.; Zheng, Y.; Li, J.; Chao, D.; Li, M. *Small*. 2023, 19(10): 2207502.

[3] Deng, J.; Luo, H.; Gou, Q.; Wang, J.; Chen, Z.; Xu, N.; Liu, Z.; He, Y.; Luogu, Z.; Jiang, G.; Sun, K.; Li, M. *J. Phys. Chem. Lett.* 2023, 14(41): 9167

## D18-163

## 天然生物黏液水下减阻实验研究

胡海豹\*<sup>1</sup>

1. 西北工业大学

随着海洋开发形势的变化, 我国海洋利用区域不断向深海、远海延伸, 如何实现舰船/潜器的节能减排和提速增程, 已成为船舶领域目前迫切需要解决的关键问题之一。减小航行阻力是同时实现上述目标的一条理想途径。1948年, Toms 发现了只要湍流流动管道内长链结构添加剂浓度达到几 ppm 到几十 ppm, 就能显著降低管壁摩擦阻力。目前, 高分子溶液湍流减阻已广泛应用于管道输运、消防应急、生物医药以及农田灌溉等方面。然而, 研究者发现聚氧化乙烯和聚丙烯酰胺等典型合成减阻剂虽然减阻效果显著, 却极易受机械剪切而使长链分子发生断裂, 造成减阻效果下降甚至丧失。之后, 有学者开始研究天然生物黏液, 发现由于具有稳定的分子结构, 生物黏液产生减阻的同时几乎不会发生剪切降解, 并且绿色无污染。为此, 报告人研究了鱼类、芦荟等多种天然生物黏液的减阻规律, 并首次开展了山药黏液、黄蓍胶和刺槐豆胶等新型生物黏液的减阻研究, 系统总结了喷射速率、浓度、雷诺数等对生物黏液减阻的影响规律, 进一步研发了生物黏液缓释涂层。研究结论可以助力高聚物水下减阻技术研发。

**D18-164****原位 SEM 微纳米力学性能测试系统在探究材料耐损伤机制中的应用**付圣权<sup>1\*</sup>, 刘乐芳<sup>2</sup>, 王锋<sup>2</sup>

1 中国科学技术大学, 合肥 230026, 中国

2 国仪量子技术(合肥)股份有限公司, 合肥 230031, 中国

随着微观 SEM 原位力学测试技术的发展, 材料科学研究迎来了一场变革。这项突破性的技术使我们能够直接观察材料在微观尺度上变形、强化和失效的全过程, 并进行实时定量表征, 从而对材料的微观结构与力学性能之间的关系有了前所未有的深刻理解, 为材料设计和性能调控提供了全新的思路和方法。中国科学技术大学理化科学实验中心扫描电镜机组配备的原位纳米力学测试系统主要包括超高分辨场发射扫描电子显微镜 (SEM5000X)、纳米力学性能测试系统 (FT-NMT04), 通过微力传感探针对材料微区施加可控的力, 同时采用位移记录器来测量材料形变。通过控制施加载荷的大小和方向等, 可实现拉伸、压缩、断裂、疲劳和蠕变等各种力学测试, 借助 SEM 实时关联材料力学特性和显微形貌变化, 分析推测材料本征及非本征强韧化机制。此外, 还可研究多场耦合条件下的结构与性能关联。目前已开展纳米压痕、微米柱压缩、单悬臂梁弯曲等相关的原位力学测试, 支撑了相关材料耐损伤机制的研究工作。[1-2]

关键词: 原位纳米力学, 扫描电镜, 耐损伤机制, 定量表征

参考文献:

[1] Schwiedrzik, J., Raghavan, R., Bürki, A., et al., Nat. Mater. 2014, 13, 740.

[2] Kim, D., Kim, M., Reidt, S. et al. Nat. Commun. 2023, 14, 750.摘要内容近年来, 水系锌离子储能器件得到了广泛的研究。它具有无毒、不易燃、高离子电导率、成

**D18-165****仿生策略调控电极-电解液界面实现高效水系锌离子电池**吴爱国\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

**D18-166****仿恒温驱动的 4D 打印自持续软体爬行机器人**李冰倩\*<sup>1</sup>

1. 吉林大学

环境驱动的可持续自主运动是一种先进的智能行为, 类似于生物体中的无意识动作, 如心跳和蠕动。在本研究中, 介绍了一种具有偏心铰链结构的自持振荡软体机器人, 该结构受软体动物爬行运动的启发。采用参数编码的 4D 打印方法预先编程偏心铰链结构的局部应变, 从而使软体机器人在恒定热场下实现可持续的爬行运动。通过基底摩擦、偏心铰链构造和基底温度的耦合设计, 软体机器人能够实现可调的爬行、滚动和振荡。作为概念验证, 展示了两个应用: 光学斩波器和发电机。该研究为软体机器人在航空航天和医疗等受限环境中的应用提供了可行的解决方案。

**墙报****D18-P01****具有氨基酸编码特性的仿生多彩色素的设计、制备与应用**申雨禾\*<sup>1</sup>, Hatice Altug<sup>1</sup>, 王跃飞<sup>1</sup>, 齐崑<sup>1</sup>

## 1. 天津大学

大自然为开发具有优异特性的可持续材料提供了巨大的灵感源泉，其中具有光学、电子和防辐射特性的黑色素被认为是前景广阔的着色材料。然而，与化学颜料相比，天然黑色素的颜色单一、氧化过程复杂、溶解性差等特点严重限制了它们的进一步应用。我们通过一个简单的三组分反应体系，推出了一系列具有氨基酸编码理化特性的类黑色素聚合物色素。氨基酸的可变侧链能够可控地改变所得色素分子的化学结构和功能特性，使它们呈现出涵盖全部可视波长范围的宏观颜色和广谱荧光发射。

该方案通过合理设计底物和掺杂剂，实现了对发色团结构的人工控制，从而将生物色素的安全性和功能性与化学染料的色彩丰富性结合起来。与天然黑色素的光保护作用类似，聚合色素在减少自由基方面表现出卓越的抗氧化活性，并具有彩虹色、着色力强、稳定和经济实惠等优点。此外，由于这些生物仿生颜料具有对基质染色的能力，因此有望成为新的低成本生物活性发色团，并在服装和头发染色、食品添加剂和防伪检测等多种生化领域得到应用。

## D18-P02

## 纤维素基高效散射柔性薄膜的制备与应用

王溢丰<sup>1</sup>, 王婷<sup>1</sup>, 杨晗\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院大学化学科学学院

实现对光的高效散射往往需要使用高折射率的二氧化钛等无机材料，这些物质被广泛运用于涂料、护肤品、甚至一些食品中来产生明亮的白色，然而二氧化钛这类物质的生产不仅会造成较为严重的环境污染，而且对人体具有潜在的致癌风险。纤维素是地球上含量最为丰富的天然高分子，具有可再生、能被生物降解和生物相容性好等诸多优点。本研究通过模拟自然界中白斑奇天牛鳞片的微观结构，利用纤维素纳米纤维相互缠绕形成的网络结构来分散与固定散射中心，即各种尺寸的纤维素基微球，并优化这些微球的粒径与分布，实现了用低折射率的纤维素基材料来制备自支撑的高效散射柔性薄膜，该薄膜在厚度仅为 10  $\mu\text{m}$  时的反射率就高达 70%。同时，这种全纤维素基薄膜具有优异的辐射制冷特性，300  $\mu\text{m}$  厚的薄膜在白天可实现降温高达 12 $^{\circ}\text{C}$ ，在夜间也可实现降温达 3 $^{\circ}\text{C}$ 。利用生物质材料特别是纤维素来构建高效散射材料，不仅能减少材料用量、降低成本，而且对环境和人体更加友好，有助于实现环保的功能涂层材料的规模化生产。

## D18-P03

## Bioinspired Transparent Robust Superhydrophobic Coating

Hang Li\*<sup>1</sup>, Shuxue Zhou<sup>1</sup>, Limin Wu<sup>1</sup>

1. Fudan University

Transparent superhydrophobic coatings offer the benefits of dirt resistance and self-cleaning, making them ideal for use in applications like exterior window glass and outdoor displays. Nevertheless, low haze superhydrophobic coatings necessitate low light scattering and light absorption, rendering them thin and susceptible to microstructural damage when exposed to abrasion from sand and dust, ultimately resulting in the loss of superhydrophobic performance. An anti-protein array pit-filled the  $\text{SiO}_2$  nanofilament structure mimicking the back of a lotus leaf was prepared for the coating in this study. The coating exhibits high transmittance and low haze. Thanks to the protection provided by anti-protein structured silicon oxide, the coating retains its excellent superhydrophobic properties even when subjected to 5 kg of water. The coating material is primarily inorganic, providing it with exceptional resistance to UV aging. After 300 days in real outdoor environments, the coating maintains its good optical and ultra-thin properties.

**D18-P04****硅相对 A390 铝合金的润湿性、自清洁性和机械耐久性的影响**刘文龙\*<sup>1</sup>

1. 山东大学

受到荷叶效应的启发,超疏水表面的制备成为研究热点。在赋予铝合金表面超疏水特性的各种方法中,化学蚀刻法是一种简便的方法。大多数研究都将蚀刻时间、蚀刻剂浓度和蚀刻剂类型作为变量,或选择化学蚀刻与其他方法相结合来制备超疏水表面。相比之下,我们更关注添加不同含量元素对蚀刻表面微观结构的影响。以添加大量 Si 的 A390 铝合金为实验对象。化学蚀刻后,A390 铝合金表面呈现出具有特定形状的硅相,包括正八面体(孪晶)初生硅相和棒状(片状)的共晶硅相。由于的含量较少,且在蚀刻过程中被腐蚀,因此它们对蚀刻表面特性的影响很小。

本文以 A390 过共晶铝硅合金(17.4 wt.% Si)为实验对象,经过化学蚀刻,在 A390 铝合金表面刻蚀出具有特定形状的 Si 相,包括正八面体状的初生 Si 相和棒状的共晶 Si 相。由于 Al-Cu-Mg 所组成的金属间相的数量很少,因此对蚀刻后的表面性能影响不大。Si 相对 A390 铝合金表面性能的影响主要有三个方面。首先, Si 相具有影响表面润湿性的能力。实验结果表明,刻蚀时间为 5min 时,改性后的 A390 铝合金表面的接触角可以达到  $153.2 \pm 1.4^\circ$ ,滚动角达到  $11.2 \pm 1.6^\circ$ 。此外,由于 Si 相的形状相对规则,它可以被拟合成特定的几何形状。根据特定几何形状的大小和分布建立润湿模型,通过 Cassie-Baxter 方程计算理论接触角,可以在一定程度上预测实际接触角。其次, Si 相可以赋予表面优异的自清洁性能。水滴很容易地从表面滚落并带走灰尘,从而保持表面的清洁。最后,裸露的 Si 相形成了一个强大的支撑骨架,大大增强了铝合金的机械耐久性。

本文为制备具有特定性能的表面提供了一种新思路。通过控制合金中添加元素的种类和含量,可使合金形成特定的金属间相或非金属间相。通过改变蚀刻过程中的实验参数,无用的相被溶解,而有用的相被保留下来,形成特定的微/纳米结构,从而实现对表面润湿性、机械耐久性等特性的精确控制。

**D18-P05****基于仿生离子通道膜的光电能量转换器件**贾盼\*<sup>1</sup>

1. 河北师范大学

开发稳定且可再生的清洁能源是实现社会可持续发展的重要途径之一。太阳能因其储量丰富、易于获取且绿色可持续的特点而备受关注。现有的光电能量转换体系主要基于光子-电子层次,近年来开发的仿生光驱动离子主动运输体系为捕获太阳能提供了新的思路。受到绿色植物和某些古细菌离子通道特殊结构和功能的启发,我们围绕光控离子输运及其光电能量转换应用这一目标,利用具有优异光响应特性和表面带电的纳米材料构筑了二维纳米通道膜材料,通过调控其结构和界面性质,深入探究了限域通道内光驱动离子主动运输的机制,实现了基于离子输运的光电能量转换,例如氧化石墨烯膜、还原的氧化石墨烯膜、WS<sub>2</sub>膜、WS<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub>异质膜。该研究方向提供了一种通过光-电-离子输运模式捕获太阳能的新方法。

**D18-P06****多材料高精度 4D 打印多彩仿生结构色**黎梓谦<sup>1</sup>, 毕燃<sup>1</sup>, 郭双壮\*<sup>1</sup>

1. 中山大学材料科学与工程学院

结构色是区别于传统化学色的一种全新的着色方式,不依赖于其成分的化学特性,因此具有更宽的材料选择范围,在稳定性、安全性、耐用性及环保性等方面均优于依靠染料与颜料的传统染色方式。同时,3D 打印技术的快速发展为结构色的加工制造提供了全新的思路。但是结构色材料通过 3D 打印制备难点在

于分辨率精细程度难以控制和可扩展性较弱。本团队制备了具有光敏活性的可打印结构色墨水，结合实验室自建的高精度多材料直写打印系统，成功实现了多彩结构色的溶剂挥发墨水直写高精度打印（Solvent cast-direct ink writing, SC-DIW）。该打印策略能在大范围内实现对打印分辨率的精准控制与复杂图案的高精度打印，并能够灵活地与多种可打印功能材料体系集成。基于此，团队创新性地将结构色材料集成至仿生机器人的制造中，在传统磁控柔性机器人表面打印结构色涂层，制备了一系列具有仿生结构色外观及无束缚变形能力的多维度仿生蝴蝶，展现了这种结构色材料 3D 打印策略在仿生机器人及其他需要先进表面着色方式的系统中的应用前景。

## D18-P07

### 基于光热响应液体门的定位流体输运研究

韩雨航<sup>1</sup>，侯旭\*<sup>1</sup>

1. 厦门大学

可控的多相流体输运在微阀门、化学检测、微反应器、软体驱动器及机器人等多个领域都有着重要的应用意义。而更精确的流体控制，诸如稳态压力下、特定位置处的多相流体输运控制将会激发更多的应用潜力。基于此，我们设计制备了一种可通过光源以快速、无接触方式，控制特定位置处的流体输运与恒压气液分离进程的光热响应液体门控系统。光热响应液体门由具有光热效应的多孔基质与毛细稳定的特定功能液体组成，我们通过理论与实验两方面验证了该系统的稳定性与流体调控机制，该机制是通过光热诱导的门控液体表/界面张力变化与 Marangoni 流动带来的门控液体重构调节流体输运压强，从而调控物质的输运行为。这种具有定位控制特点、不包含机械组件与复杂零件的调控机制将会为小型化、一体化的多种工程应用提供可能，在智能阀门、多相分离、多相反应器等领域具有重大应用潜力。

## D18-P08

### 仿海马尾柔性机械臂的设计与增材制造

付韞辰<sup>1</sup>，刘天琪<sup>1</sup>，张祥林<sup>1</sup>，吴斌<sup>1</sup>，黄威\*<sup>1</sup>

1. 华中科技大学

灵活可靠的机械臂在智能制造、医疗机器人、探索和救援等领域至关重要。传统的“硬”机械臂在抓取方面存在局限性，而软机械臂虽然能够实现灵活抓握，但在压力和冲击的作用下容易失效。研究表明，自然界中海马尾巴具备优异的灵活抓握的功能同时，由于其多材料多尺度的设计，有效地克服了抗压抗冲击的难题。本课题以海马尾为灵感，采用多材料 3D 打印技术，设计并制造了一种兼具抓握能力和抗压抗冲击能力的软硬材料相结合的仿生机机械臂。机械臂的框架包含一个具有自锁功能的柔性滑动关节，提供弹性，并起到吸收冲击能量的作用。准静态压缩测试表明，机械臂能够承受自身重量 3000 倍的压力，即使在压缩变形高达 30% 的情况下，也能保持其内部结构不受损坏。为了评估机械臂的抓握能力，我们为机械臂安装了电机驱动系统。通过测试，发现机械臂能够实现弯曲和缠绕两种抓取模式，并且能够实现类似于海马尾的不同曲率物体的多模态抓取，展现出优异的抓握能力。

## D18-P09

### 仿马蹄层状和管状抗冲击结构设计及其增材制造

冯伯远<sup>1,2</sup>、钟佳明<sup>1,2</sup>、付韞辰<sup>1,2</sup>、杨文<sup>3</sup>、李泽洲<sup>4</sup>、鲍佳伟<sup>4</sup>、王扬卫<sup>4</sup>、周华民<sup>1,2</sup>、Robert O. Ritchie<sup>3,5</sup>、梁旭东<sup>6</sup>、黄威\*<sup>1,2</sup>

1. 华中科技大学

2. 华中科技大学材料加工与模具技术国家重点实验室

3. 美国劳伦斯伯克利国家实验室
4. 北京理工大学
5. 美国加州大学伯克利分校
6. 哈尔滨工业大学（深圳）

材料和结构的抗冲击以及能量吸收能力是其在工程应用中一个重要的因素。在承受极端压缩和冲击载荷时，具备一定的能量吸收能力的结构和材料可以有效地保护内部脆弱的功能区域，例如头盔等可有效防护颅骨受到的冲击损伤。多孔结构对于能量的吸收与耗散效果已被广泛认识。它们能够通过材料塑性变形或断裂、结构溃缩等吸收能量。而在目前的工作中，我们揭示了角和蹄等天然角蛋白材料及其组织结构是如何通过层片状和管状微观结构的布置来控制载荷下裂纹的产生和扩展，从而吸收压缩和冲击能量。这些天然材料凭借微裂纹和界面的产生，在不产生较大的空隙区域的同时便能吸收可观的能量。受这些生物组织的启发，我们采用多材料聚合物 3D 打印技术设计与制造了层片与管状结构。在此基础上的仿生设计表现出了良好的能量吸收密度，可达  $18.75\text{KJ Kg}^{-1}$ ，性能堪比金属泡沫结构和仿生蜂窝结构。在片层和管状结构中，软硬材料界面的引入显著提高了抗冲击强度，能量吸收率达到了单一材料对照组的 167%。即便在  $2000\text{s}^{-1}$  的高应变率下，该仿生结构也能保持较好的完整性，表现出了对剧烈变形和破坏的抵抗力。此仿生结构在准静态和高应变率场景下表现出良好的能量吸收效果，可以为抗压抗冲击工程结构的设计与实现提供参考。

## D18-P10

### 仿生纳米通道用于离子检测

王艳琼\*<sup>1</sup>

1. 厦门大学

生物大脑中的神经活动与神经元细胞离子通道密不可分，受此启发，开发仿生离子纳米通道器件[1]，通过离子通道控制离子的传输，深入探索纳米通道表面结构与电荷、通道与离子界面相互作用、界面诱导的离子聚集与解聚、吸附与脱附等界面性质对离子传输的影响[2,3]，阐明纳米通道界面性质离子传输及离子浓度的不同响应。我们构建了一种可靠的单宁酸功能化的单玻璃纳米通道，单宁酸能够提供具有特定离子亲合能的多酚官能团，能够实现金属离子的特异性识别和超痕量检测[4]，该系统显示出高效和快速的特征。理论计算和实验研究均表明纳米通道内表面的三羟基酚基团与不同金属离子之间的不同亲合能实现金属离子的有效区分，特别是结合能显著的铁离子。因此，这种单宁酸功能化的纳米通道系统具有在纳米限域空间中方便快速识别多价金属离子的潜力，进一步促进仿生智能纳流器件在离子检测与物质传感等领域的应用。

参考文献：

- [1] Yaqi Hou, Xu Hou. Bioinspired Nanofluidic Iontronics. *Science* 2021, 373: 628-629.
- [2] Yaqi Hou#, Yixin Ling#, Yanqiong Wang, Miao Wang, Yeyun Chen, Xipeng Li, Xu Hou. Learning from the Brain: Bioinspired Nanofluidics. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2023, 14: 2891-2900.
- [3] Yixin Ling, Lejian Yu, Ziwen Guo, Fazhou Bian, Yanqiong Wang, Xin Wang, Yaqi Hou, Xu Hou. Single-pore nanofluidic logic memristor with reconfigurable synaptic functions and designable combinations. *Journal of the American Chemical Society* 2024, 146: 14558-14565.
- [4] Kan Zhan, Ziyi Li, Jun Chen, Yaqi Hou, Jian Zhang, Runqing Sun, Zhenxiang Bu, Lingyun Wang, Miao Wang, Xinyu Chen, Xu Hou. Tannic acid modified single nanopore with multivalent metal ions recognition and ultra-trace level detection. *Nano Today* 2020, 33: 100868.

**D18-P11****基于微相分离的可拉伸离子凝胶用于多模态离子皮肤**吕东<sup>1</sup>、李鑫<sup>1</sup>、黄鑫<sup>1</sup>、曹春艳<sup>1</sup>、艾丽青<sup>1</sup>、王雪娇<sup>1</sup>、Sai Kishore Ravi<sup>1</sup>、姚希\*<sup>1</sup>

1. 香港城市大学

Bioinspired artificial skins integrated with reliable human-machine interfaces and stretchable electronic systems have attracted considerable attention. However, the current design faces difficulties in simultaneously achieving satisfactory skin-like mechanical compliance and self-powered multimodal sensing. Here, this work reports a microphase-separated bicontinuous ionogel which possesses skin-like mechanical properties and mimics the multimodal sensing ability of biological skin by ion-driven stimuli-electricity conversion. The ionogel exhibits excellent elasticity and ionic conductivity, high toughness, and ultrastretchability, as well as a Young's modulus similar to that of human skin. Leveraging the ion-polymer interactions enabled selective ion transport, the ionogel can output pulsing or continuous electrical signals in response to diverse stimuli such as strain, touch pressure, and temperature sensitively, demonstrating a unique self-powered multimodal sensing. Furthermore, the ionogel-based I-skin can concurrently sense different stimuli and decouple the variations of the stimuli from the voltage signals with the assistance of a machine-learning model. The ease of fabrication, wide tunability, self-powered multimodal sensing, and the excellent environmental tolerance of the ionogels demonstrate a new strategy in the development of next-generation soft smart mechano-transduction devices.

仅发表论文

**D18-PO01****MOFs 绿色合成及其结构化集水模块制备和性能的研究**张雯\*<sup>1</sup>

1. 西安交通大学化学学院

淡水是人类生存发展不可或缺的资源，随着社会的发展，人们对于淡水的需要越来越大，但是淡水资源在全球的分布却极其不均衡。仿生研究表明，自然界中一些生物进化出的特殊智能结构，能从雾气中提取水分以满足生存需要。受此启发，利用金属有机框架（metal-organic framework, MOF）的高比表面积和结构可调性特性，设计制备从大气中的水蒸气进行吸附的集水装置，以获得解决淡水的新途径。

本文通过水热合成法绿色合成 MOF-303 与 MOF-808 两种亲水 MOF 材料，测试比较了二者的吸水性能，并设计制作了方便运输的 MOF-303 薄片状集水模块，并通过建模设计得到满足要求的可以搭载薄片的装置，采用 3D 打印最终得到可以自由控制吸收和释放水分的装置。研究显示，条件优化后获得的 MOF-808 薄片在高湿度下的吸水能力要强于 MOF-303。在相同测试条件下，粉末和薄片的吸湿性能无显著变化。设计组装得到的装置可以有效搭载薄片，为连续集水提供了良好结构基础。

**D18-PO02****一种模拟绿色植被光谱特性的颜料制备**祖梅\*<sup>1</sup>、周浩言<sup>2</sup>

1. 西安交通大学化学学院

2. 湘潭大学

通过液相离子交换法制备铬改性分子筛，制备了一种能够兼具绿色植被可见近红外两个波段光谱特征

的颜料体系。利用分子筛的离子交换特性引入有色的铬金属阳离子，并对其光谱反射特性以及水蒸气吸附能力进行了研究。改性后的分子筛比表面积和孔容由  $518.764\text{m}^2/\text{g}$  上升到  $560.447\text{m}^2/\text{g}$ ，在恒温恒(40%RH, 25°C)条件下吸湿率提高了 11.2%，单一颜料与绿植叶片的光谱相似度高达 0.947。