

D18 仿生材料

时间：2023 年 7 月 8-10 日

地点：深圳国际会展中心

分会主席：

俞书宏

中国科学技术大学

江 雷

中国科学院理化技术研究所

联系人：

侯 旭

厦门大学

电 话：0592-2180937

邮 箱：houx@xmu.edu.cn

王树立

厦门大学

电 话：19906046204

邮 箱：slwang@xmu.edu.cn

D18. 仿生材料

分会主席：俞书宏、江雷

D18-K-01

仿生超浸润界面体系——基于量子限域超流的能量转换/化学反应/信息传输

江雷*

中国科学院理化技术研究所

生物孔道离子和分子以单链的量子方式快速传输，我们将其定义为“量子限域超流体”。近期研究表明仿生体系也存在量子限域超流现象，例如离子通道和水通道内物质的快速传输。把量子限域超流体引入能源、化学和生物等领域将产生重大影响。量子限域超流体概念作为对传统理论的挑战，将开辟量子离子学的新领域，促进能量转换材料体系的发展和应用，颠覆对神经科学和脑科学中神经信号传输等问题的理解；并将推动界面催化化学理论的发展，为化学、化工和合成生物学等领域的未来发展开辟新的道路。

D18-I-01

生物启发下的膜和膜过程研究

姜忠义*

天津大学

膜技术是以选择透过性膜为介质，以化学位差为推动力，实现混合物分离纯化的新技术，具有绿色、高效、节能和低碳等特点。模仿和借鉴自然界中生物材料多样的组成、精巧的结构、温和的形成过程以及强大的功能，研究者们设计制备了多种高性能膜材料，并在水处理、分子分离、离子分离等领域显示出良好的应用前景。

本报告将以仿生与生物启发下的膜和膜过程研究为主题，围绕膜污染、膜渗透性和选择性间相互制约的博弈效应(tradeoff 效应)这两个共性关键科学问题，重点介绍生物启发原型和膜制备方法，包括受细胞膜中脂质与蛋白质组装过程启发，开发表面偏析技术解决膜污染问题；基于生物矿化原型，开发仿生矿化技术，优化界面结构，突破 tradeoff 效应；基于生物粘合原型，开发仿生粘合技术，构筑稳定异质界面结构等。同时，介绍仿生与生物启发思想在水处理、碳捕集和清洁能源等领域的应用。

仿生和生物启发膜是膜领域的重要分支，代表着未来膜技术的发展方向之一，在资源、能源高效利用和可持续发展等方面将发挥越来越大的作用。

D18-I-02

二硫动态可控聚合及其智能组装材料

曲大辉*

华东理工大学化学与分子工程学院

利用“自下而上”策略，在分子层面利用合成化学工具精准改造分子基元，然后通过分子间相互作用力（即超分子化学）将分子尺度的本征性质和动态行为集成、放大到宏观材料尺度，是化学家设计动态分子材料的基本手段。因此，发现和拓展“动态化学工具箱”(dynamic chemistry toolbox)是构筑动态智能材料的化学基础。我们发现了一种天然小分子硫辛酸的本征结构特点，其极其简单的分子骨架同时包含了动态共价二硫键以及非共价键羧基单元，以此开发了一种动态超分子聚合物的简单、高效的制备方法，本报告将聚焦我们在该方向的一些探索。

参考文献

- [1] Chen-Yu Shi, Qi Zhang, Ban-Sen Wang, Dan-Dan He, He Tian, Da-Hui Qu*, CCS Chem. 2022, 4, <https://doi.org/10.31635/ccschem.022.202202158>.
- [2] Qi Zhang, Stefano Crespi, Ryojun Toyoda, Romain Costil, Wesley R. Browne, Da-Hui Qu*, He Tian, J. Am. Chem. Soc. 2022, 144, 4376-4382.
- [3] Qi Zhang, Da-Hui Qu*, Ben L. Feringa, He Tian*, J. Am. Chem. Soc. 2022, 144, 2022-2033.
- [4] Yuan-Xin Deng, Qi Zhang, Chen-Yu Shi, Ryojun Toyoda, Da-Hui Qu*, He Tian, Ben L. Feringa*, Sci. Adv. 2022, 8, eabk3286.
- [5] Shang-Wu Zhou, Fei Tong, Meng Chen, Ruirui Gu, Chen-Yu Shi, Cheng-Yuan Yu, Qi Zhang, Da-Hui Qu*, Angew. Chem. Int. Ed. 2022, e202117195.
- [6] Chen-Yu Shi, Dan-Dan He, Qi Zhang, Fei Tong, Zhao-Tao Shi, He Tian, Da-Hui Qu*, Natl. Sci. Rev. 2022, 9, nwac139.
- [7] Qi Zhang, Yuan-Xin Deng, Chen-Yu Shi, Ben L. Feringa*, He Tian, Da-Hui Qu*, Matter 2021, 4, 1352-1364.
- [8] Yuan-Xin Deng, Qi Zhang, Ben L. Feringa*, He Tian, Da-Hui Qu*, Angew. Chem., Int. Ed. 2020, 59, 5278-5283.
- [9] Qi Zhang, Yuan-Xin Deng, Hong-Xi Luo, Chen-Yu Shi, Geoffrey M. Geise, Ben L. Feringa*, He Tian, Da-Hui Qu*, J. Am. Chem. Soc. 2019, 141, 12804-12814.
- [10] Qi Zhang, Chen-Yu Shi, Da-Hui Qu*, Yi-Tao Long, Ben L. Feringa*, He Tian*, Sci. Adv. 2018, 4, 8192-8199.

D18-I-03

3D 打印生物仿生材料

吴成铁*

中国科学院上海硅酸盐研究所

3D 打印技术是组织工程和再生医学领域最有前景的技术之一，其能够在三维空间中逐层堆叠多种成分（材料、细胞等），从而构建出复杂而精确的结构。因此，对于组织再生支架的构建，3D 打印方法已远远超越了其他传统的制造方法。如何通过巧妙的设计，利用 3D 打印技术构建具有不同组成、结构和功能的个性化组织再生支架是再生医学领域的研究重点。我们针对 3D 打印支架仿生化、功能化的需求开展了一系列研究工作，从材料设计、结构调控，到功能化改性，再到多细胞打印人造组织，开发了多种具有优异生物学功能的 3D 打印组织再生支架。

首先，我们通过对 3D 打印支架的宏/微观结构进行调控，构建了一系列具有优异组织修复性能的仿生支架。宏观上，通过精确的模型设计，打印出仿生莲藕[1]、天然骨多级结构[2]等支架，能够有效促进血管化骨再生。微观上，通过将微生物催化等技术与 3D 打印技术相结合，构建出具有特定微纳米结构的 3D 打印支架，显著地提升了支架的成骨性能[3]。

对于疾病所导致的组织缺损，具有单一修复功能的支架不能达到理想的治疗目的。因此，我们进一步将 3D 打印技术与表面改性策略相结合，开发了多种兼具肿瘤治疗和组织再生双重功能的仿生 3D 打印支架[4]，从而更高效地治愈由肿瘤疾病导致的缺损。

此外，针对复杂组织/器官的再生和构建，需要开发出多细胞规律排布的仿生支架。因此，我们将 3D 材料打印进一步拓展到 3D 多细胞打印，通过调控生物墨水的组成，设计细胞空间分布，构建出模拟不同复杂组织的多细胞支架[5]。通过 3D 细胞打印构建的多细胞支架在体内、体外均具有优异的组织再生功能，这也为其他复杂组织/器官的三维重建提供了基础。

参考文献:

- [1] Wu C, et al., Advanced Science, 2017, 4: 1700401.
- [2] Wu C, et al. Science Advances, 2020, 6.
- [3] Wu C, et al. Advanced Materials, 2021, 33: 2104829.
- [4] Wu C, et al. Advanced Functional Materials, 2016, 26: 1197-1208.
- [5] Wu C, et al. Materials Today, 2021, 49: 68-84.

D18-O-01**固-液界面材料的多维调控**

邓旭*

电子科技大学

调控液体在固体表面的流体动力学行为在化工、医疗、农业以及能源应用上有着广泛的应用。我们从研究固液界面之间的物理化学相互作用出发，分析液体在特殊固液界面复合材料上的流体动力学行为。通过设计特殊的固液表面的几何形貌和微纳复合结构。尝试去解决界面材料抵御低表面能液滴浸润，固液界面持久性以及功能结构稳定性的难题，并利用新的界面电荷富集效应，开拓界面功能材料的潜在应用。针对固-液界面功能材料的稳定性问题，报告人从基础理论出发，通过研究固-液界面跨尺度（从分子尺度到微米尺度）的相互作用，界面与光、电、机械力等外场的协同效应，实现对功能界面材料结构的精准构筑及与性能的精确调控，本报告将介绍以下相关工作：1、固-液界面浸润机制研究：研究了低表面能液体在固体材料上的浸润机理，并根据浸润机理提出分形拓扑几何结构，实现了低表面能液体在固体表面上保持稳定的非浸润状态（Cassie-Baxter）；揭示了固-液-气三相接触线动态浸润稳定性规律；探究了固-液界面分离诱导的表面电荷富集效应对固-液界面动态浸润性的影响规律。2、固-液界面材料的功能稳定性研究：从固-液界面浸润理论研究出发，提出一种新的去耦合材料设计机理，解决了固-液界面材料功能易失效的瓶颈问题。研究成果为设计稳定的固-液界面功能材料提供了重要的理论指导。

参考文献:

- [1] Chemical Society Reviews, (2021), 50, 4031-4061
- [2] Nature, (2020) 582, 55 2.
- [3] National Science Review, (2020) nwaa153, 2.
- [4] Advanced Materials, (2021), 2007154
- [5] Nature Materials, (2019) 18, 236 3.

D18-O-02**柔性智能材料的界面调控合成及应用探索**

从怀萍*

合肥工业大学

随着柔性电子产业的崛起和高速发展，具有柔韧、智能和曲面设计的柔性材料可与复杂曲面表面无缝衔接，显著扩展了传统刚性材料在显示、传感、监测、诊断与干预等功能方面的能力，在未来电子产品、医疗健康监控等领域具有重要应用。本工作主要讨论近年来我们在柔性智能材料的结构设计、界面组装合成及其性能调控领域的研究进展。包括：发展了基于动态金属配位作用的纳米复合交联聚合合成法，研制了自修复耐拉伸弹性导体材料，合成了三重刺激响应自修复弹性复合凝胶电极；揭示了紫外光诱导下金属纳米颗粒二维自组装规律，普适合成了高度各向异性自修复超弹性复合凝胶；发展了“取向组装与程序化聚合”相结合方法，实现了具有高曲率蜂窝交联网络结构、极端环境耐受的抗压缩弹性导体材料的普适合成；发明了一种简易高效的滑动铸造技术，实现了大面积水凝胶薄膜的快速印刷和表面图案

化。进一步探索了所合成的材料在柔性能源器件和可穿戴电子器件领域的应用潜力。

参考文献:

1. Y. Wang#, H. Qin#, Z. Li, J. Dai, H.-P. Cong*, S.-H. Yu*, Nature Synthesis 2022, Doi:10.1038/s44160-022-00167-5
2. H. Qin#, N. Li#, H.-M. Xu, Q.-Y. Guo, H.-P. Cong*, S.-H. Yu*, Angew. Chem. Int. Ed. 2022, e202209687
3. J. Dai#, H. Qin#, W.-X. Dong, H.-P. Cong*, S.-H. Yu*, Nano Lett. 2022, 22(15), 6444-6453.
4. P.-P. Jiang#, H. Qin#, J. Dai, S.-H. Yu, H.-P. Cong*, Nano Lett. 2022, 22(3), 1433-1442.
5. H. Qin#, P. Liu#, C. Chen, H.-P. Cong*, S.-H. Yu*, Nat. Commun. 2021, 12, 4297.
6. H. Qin#, T. Zhang#, N. Li, H.-P. Cong*, S.-H. Yu*, Nat. Commun. 2019, 10, 2202.

D18-O-03

丝蛋白仿生材料

凌盛杰*

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。深入研究成丝机制与其生物结构的设计策略,不仅能为丝基材料的高效利用提供指导,而且能为特种纤维的设计与制造提供灵感。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,从而可掌握其“结构-性能-功能”关系。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-O-04

仿生界面超铺展

田野*

中国科学院理化技术研究所

界面超铺展在生产生活的诸多领域都有广泛的应用^[1]。研究发现:动物角膜表面具有非常显著的超快铺展性质(超铺展时间为 830 ms),这种特殊的性质是由角膜表面独特的微米槽道环绕纳米线阵列结构赋予的^[2],纳米线阵列间的三维纳米毛细力引起铺展行为,而超铺展的动态速度则由微米槽道主导。除了生命体系内,在人工材料领域也具有非常经典的超铺展现象,例如我们祖先制备的宣纸,可以优先在二维平面上实现超铺展而在纵向上不渗透^[3]。

在分子尺度上,水在界面的超铺展行为主要受液体与基底之间的分子间作用力的影响,如氢键,静电力,范德华力等等。研究发现,液体的铺展行为取决于界面第一层水的排列,即水分子在界面的氢键网络结构^[4]。通过同时调控分子间作用和界面空间的尺寸,可以在不同维度的界面上实现超铺展过程,进而实现在分子离子传输等领域的应用^[5]。

参考文献

- [1] Acc. Chem. Res. 2022, 55 (11), 1467-1479.
- [2] Adv. Mater., 2021, 33 (23), 2007152.
- [3] Adv. Funct. Mater., 2018, 28 (49), 1800832.
- [4] Natl. Sci. Rev. 2021, 8, nwaa166.
- [5] Adv. Mater. 2021, 2003559.
- [6] Sci. Adv. 2018, 4 (12), eaau8767.
- [7] Adv. Mater. 2019, 31 (7), 1805953.
- [8] J. Am. Chem. Soc. 2019, 141 (22), 8658-8669.

D18-I-04**框架核酸界面调控及生物医学应用**

左小磊*

上海交通大学

生物探针的界面自组装及其精确调控一直是制约生物传感领域发展的瓶颈问题，直接关系着生物探针的识别效率、识别速度和特异性等关键指标。我们致力于将框架核酸与界面生物分子的自组装精确调控相结合，可以在纳米级精度，实现生物分子的界面调控（包括对生物探针的组装密度，空间取向等）。在利用四面体框架核酸作为生物传感新平台的基础之上，我们设计了一系列具有不同尺寸大小的新型四面体，可在 2.38-12.8 纳米之间精确调控 DNA 探针之间的纳米距离，并通过电化学，荧光，原子力显微镜技术对这种界面进行了表征与测定，并深入探讨了 DNA 探针的识别效率和速度与探针之间距离的密切关系。我们称此技术为“跨尺度的界面精确调控”，即传感界面具有纳米级精度的调控特性，同时又可以实现宏观尺度的制备。纳米级精确调控保证了传感界面的快速传质过程，而在宏观尺度的制备保证了极低浓度的靶分子与探针的碰撞几率。充分利用框架核酸精确可调的特点，进一步发展了针对蛋白质、核酸（DNA/RNA）、小分子等不同分子水平靶标的高灵敏检测方法。基于这一精确自组装策略发展的通用生物检测平台为实现多分子水平肿瘤标志物的联合奠定了基础，为实现癌症早期精准检测提供了强有力的工具。

D18-I-05**仿生多尺度孔道研究**

侯旭*

厦门大学化学化工学院

厦门大学物理科学与技术学院

自然界中经过数百万年进化形成的种类繁多的智能生物体，为仿生材料设计带来无尽灵感。从小型生物离子通道到大型输油管道，“孔”和“通道”结构随处可见：例如，生物体内纳米尺度下的离子通道在维持生理状态的平衡方面起着重要作用，是保证离子选择性转运的“智能”门即仿生纳流离子学。多尺度孔道系统已被广泛探索，现已应用于材料科学、膜科学和技术，且在分析、生物医学和能源应用的微/纳米技术领域具有很好的应用前景，但仍需更多更细致的研究工作，包括开发具有节能、抗污、抗腐蚀、抗堵塞、系统通道开关性能转化与可控性集成和限域空间稳定等性能的孔道体系。受生物启发，我们在多尺度孔道系统中引入液体门控机制与动态纳米孔道运输机制，设计开发新型功能复合微纳米孔道材料，把传统的固体-气体和固体-液体体系的科学问题拓展到了固体液体-气体和固体液体-液体体系和同时探讨在纳米限域空间中研究孔道动态形变对物质运输的影响。

参考文献

- [1] Hou X.* et al. Adv. Mater., 2022, 34: 2107327.
- [2] Hou X.* et al. Nat. Commun., 2022, 13: 1906.
- [3] Hou X.* et al. Angew Chem. Int. Ed., 2022, DOI: 10.1002/anie.202201109.
- [4] Hou X.* et al. Science, 2021, 373: 628-629.
- [5] Hou X.* et al. Sci. Adv., 2020, 6: eabb4700.
- [6] Hou X.* Natl. Sci. Rev., 2020, 7: 9.
- [7] Hou X.* et al. Adv. Mater., 2019, 31: 1805130.
- [8] Hou X.* et al. Angew Chem. Int. Ed., 2019, 58: 3967.
- [9] Hou X.* et al. Sci. Adv., 2018, 4: eaao6724.
- [10] Hou X. et al. Nature, 2015, 519: 70.

D18-I-06**仿生湿黏滑表界面功能材料**

周峰*, 麻拴红, 马延飞

中国科学院兰州化学物理研究所

湿黏附和水润滑是自然界中存在的两种典型表界面特性, 过去的 10 年里, 我们团队围绕相关课题做了大量的研究工作。本报告中, 我将介绍团队在表界面湿黏滑研究方面的系列科研进展。(1)湿滑。动物组织或器官接触界面通常存在接触形变与摩擦问题, 良好的润滑能够大幅度降低滑动界面的摩擦力, 延缓磨损的产生。例如, 天然关节软骨能够在极高机械压力下展现出超低摩擦力和长效寿命。使用湿软材料来仿生天然关节软骨一直是材料科学和工程领域的前沿热点, 并且颇具挑战。受关节软骨独特的生化结构特征以及优越的水润滑机制启发, 我们以高强韧水凝胶为基底, 通过亚表面引发自由基聚合技术, 将微米级别厚度的亲水性聚电解质牢固地键合在水凝胶亚表面, 开发了一系列具有层状、梯度化结构特征的仿生软骨水润滑材料。表层的聚电解质刷-水凝胶复合层其水化度和力学模量均与天然软骨浅表面相似, 能够提供有效的水润滑, 而基层的高强韧水凝胶力学性能与本体软骨相同, 能够提供优异的承载能力。所制备的仿生软骨水润滑材料能够在超过 8MPa 的赫兹接触应力条件下, 展现出超低的摩擦系数和优异的抗磨损寿命, 这一性能非常接近天然关节软骨。我们从界面接触和水化效应双重角度研究了其界面减摩和抗磨机制, 并应用团队自主发展的修饰方法实现了仿生软骨水润滑材料在商业化人工关节材料表面的涂层化验证, 这些研究结果为开发新型的植介入型关节软骨材料提供了关键技术路线。(2)湿黏附。如今, 面向苛刻工况的水下高性能粘合剂材料需求迫切, 很多使役环境要求粘合剂必须具有长效抗水粘接、耐机械应变与机械微动等性能指标。因此, 研究自然界生物在流体应变环境下的黏附机理很有必要, 这为开发用于湿环境的工程可靠黏附材料提供了科学启示。尽管, 这些年来领域内针对仿生湿黏附材料的制备和界面机制研究已经取得了突出进展, 但面向实际工程应用环境的仿生高性能黏附胶材料报道并不多。我们研究团队通过一些先进的制备理念和策略, 如分子链段精确控制、本体结构设计和界面接触与水化调控, 开发了一系列智能响应和工程自适应型仿生湿黏附材料, 从接触和水化双重角度研究了界面湿黏附机制, 材料性能指标有望满足实际工程应用要求, 在水下静/动密封、医疗设备和软机器人等领域展现出重要的应用前景。

D18-O-05**仿生多尺度中空纳米纤维功能材料**

赵勇*

北京航空航天大学 化学学院

许多生物体具有多级次中空多孔结构，这些多孔分级结构赋予其轻质高强的结构和高效传质通道，这种多尺度结构是天然生物材料区别于传统人造多孔材料最典型的特点之一。传统人工合成多孔材料的制备与应用往往是在单一合成机制及单一用途驱动下完成，通常存在孔径单一或功能单一的不足，因此，仿生制备具有多级次孔结构的中空纳米材料在吸附、分离、催化、能源存储、药物缓释等众多领域具有重要意义。

电纺丝技术是一种制备微纳米级纤维材料的有效方法，所制备的纤维材料在吸附、催化、能源等领域表现出较好的性能，但是传统的制备产物大多结构组成单一。我们利用多流体复合电纺技术，通过控制纺丝过程中外层流体和多股互不相溶的内层流体之间的稳定的层流作用，制备了具有多通道和多孔结构的微纳米中空纤维。此外，我们将多流体纺丝技术结合软硬模板方法、利用异质材料扩散速率差异性及梯度退火处理等工艺，制备了一系列具有多级次中空结构的纳米纤维材料。由于这些材料具有微纳米多尺度结构和异质组成，使这些材料在高倍率长循环锂/钠离子电池电极材料、高效异相催化、环境净化等方面表面出优异的性能。

D18-O-06

磁性仿生材料及其在肿瘤诊疗领域的应用

陆杨*

合肥工业大学

磁性细菌、大马哈鱼以及鸟内的脑部都发现了天然的磁性纳米材料，如何有效利用磁性纳米材料并充分发挥其功能是经过了自然进化的选择。本课题组基于磁性纳米生物材料，主要关注其制备、仿生组装以及生物应用^[1-2]。通过模仿磁性细菌和阿米巴变形虫，实现了具有粘流态内核的载药胶束的铁磁性功能化，解决了磁响应性温敏胶束升温速度慢的问题，实现了磁热消融与化疗的有效协同增效，开发了磁驱动可变形的深层肿瘤药物载体^[3-4]。受生物体中广泛存在的无定形碳酸钙高含水量特性的启发，通过仿生矿化策略制备出钆掺杂的磁性无定形碳酸钙，其磁共振成像性能比临床常用钆造影剂提高了一个数量级^[5]。

参考文献：

- [1] Yang Lu#, Yun-Jun Xu#, Guo-bing Zhang#, Daishun Ling#, Seung Hong Choi*, Taeghwan Hyeon*, Duo-Hong Zou*, et al, Nat. Biomed. Engin., 2017, 1, 637.
- [2] Tao He*, Baoqiang Cao*, Yang Lu*, et al, Nano Letters, 2022, 22, 2251.
- [3] Yang Lu*, Xianzhu Yang*, Shu-Hong Yu*, et al, Natl. Sci. Rev., 2020, 7, 723.
- [4] Yang Lu*, Xianzhu Yang*, Jun Wang*, et al, Adv. Funct. Mater., 2021, 2103655.
- [5] Yang Lu*, Helmut Cölfen*, Shu-Hong Yu*, et al, Nat. Commun., 2022, 13, 5088.

D18-O-07

结构黏附表面的仿生设计

薛龙建*、史哲坤、朱博、肖康健

武汉大学

自然界中，树蛙、壁虎等动物利用脚掌上的微观结构可以紧密黏附在具有不同性质的表面上。这些微结构一方面可以使得它们能在固体表面形成有效接触，从而产生强黏附力；另一方面，它们又能从黏附表面轻松脱离。受这些动物黏性微结构的启发，我们获得了一系列黏附力很强的微纳米柱状阵列结构，探讨了微纳米结构对其在不同表面黏附性能的影响规律。在此基础上结合材料对光、电、温度和湿度的响应，获得了多种黏附力可控调节的智能结构黏附材料。进一步地，我们将仿生微米柱阵列耦合进软体

机器人中，使得软体机器人具有在光滑/粗糙、干燥/潮湿、高/低温、上/下坡等表面定向运动的能力。

D18-O-08

类液体涂层用于表面防污抗微残留的研究

田雪林*

中山大学

类液体表面是接枝了高度柔性分子刷从而表现出类液体特性的表面。典型的类液体表面一般是接枝具有极低玻璃化转变温度的聚合物分子刷，其玻璃化转变温度在零下 100°C 以下，因此在室温下表现出类似液体特性。传统上，这类表面的研究主要限于简单的疏水及疏油应用。我们对类液体功能化表面作了大量研究，发现其具有一些非常独特的界面物理化学特性，可用于抑制各种液体输运及转移过程中的微残留及表面污染。1) 将类液体分子刷涂层引入连续微带结构表面，发现其可有效抑制液体输运过程中微残留从而实现微观无损液体输运。这是因为类液体分子刷大的本征后退角和界面润滑可显著提高液体在表面形成微观夹带液膜的临界速率，从而避免了液膜破裂导致的微观残留。2) 发现类液体涂层修饰的分离微柱结构超疏表面相比于传统氟硅烷修饰超疏表面，在液滴滑落过程中可减少微观液体残留 80% 以上。这主要是因为类液体表面高的本征后退角可以延迟毛细桥夹断效应，从而显著减少了残留体积。3) 将类液体涂层引入到多孔膜分离体系中，发现其在原油/水混合物分离方面相比于传统膜具有显著增强的抗污染及分离通量。这主要得益于类液体分子刷一方面可以降低油性污染物的黏附，另一方面可能通过界面滑移促进分离通量的提高。

D18-O-09

“滴液成膜”-基于液滴超铺展的聚合物超薄膜制备新技术

张鹏超*

武汉理工大学

液滴可控铺展是表界面化学领域的基本科学问题之一，也是柔性聚合物薄膜与器件制备及应用中的重要物理化学过程。围绕液滴铺展的调控机制这一基本科学问题，从促进液滴三相线（即气/液/固）的快速移动出发，提出基于限域界面调控液滴铺展的新策略，构筑液/准液态凝胶限域界面实现了液滴超铺展（即快速且完全铺展），发展了二维纳米材料超快有序组装新技术，开发了系列超强层状聚合物纳米复合薄膜。主要内容包括：（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，实现了油/水凝胶限域界面水滴超铺展，水/油凝胶限域界面油滴超铺展；（2）“滴液成膜”新技术：利用液滴超铺展过程中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；进一步利用液滴超铺展所形成的均匀稳定限域液层，开发了柔性聚合物薄膜可控制备新技术；实现了一系列高性能聚合物薄膜的连续大规模制备。

D18-O-10

光驱微纳机器人-个体操控与多通道响应

郑靖*

厦门大学

微纳马达是一类尺寸与细菌大小相仿，并利用电场、磁场、声场、热场、光场等，在液相中受控运动的微型机器人。其在先进微纳制造、靶向药物传递、微创显微手术、环境修复等领域都有着广阔的应用前景。在这些应用前景中，多个微纳机器人需要独立控制并协同工作来执行复杂的任务，因此如何实现多通道的独立操控显得尤为重要。在各种驱动方式中，光驱动是一种很有吸引力的方法，可以通过吸

收光子产生推进动力，并对不同能量的光子作出不同的响应，这使其具有远程操控、独立寻址和多通道响应的可行性。同时，光在振幅、序列、波长、方向和偏振等方面的多重可调性，赋予了光驱动方式卓越的灵活性，并为开发具备更多复合功能的微纳机器人铺平道路。

D18-O-11

光控液滴

杜学敏*

中国科学院深圳先进技术研究院

液滴操控因在化学反应、能源环境、生物医学等领域具有巨大应用前景而备受瞩目。将外部物理场如光、电、磁等转换为液滴运动的驱动力虽能实现远程无接触液滴操控，但仍面临如下挑战：一方面，液滴驱动面临距离短、速度低、操作环境受限等适应性差挑战；另一方面，液滴驱动通常需借助大型设备、额外的响应性添加剂等，影响操控便利性且会导致液滴污染，极大限制了在生物医学等领域应用。基于此，我们提出了基于光热释电高分子材料表面（简称 PICS）的液滴操控，因该材料具有高效、持久、稳定的光热释电性能，且兼具光与电场操控液滴的独特优势，故在超疏与超滑两种不同环境下皆实现了卓越的光控液滴效果。在超疏环境下，PICS 的优异光热释电性能有效避免了环境湿度对光诱导的表面电荷影响，实现了长距离、高速、精准与多模态液滴操控；在超滑（表面覆盖一层油膜）环境下，PICS 甚至能消除油介质对表面电荷的屏蔽效应，实现了反重力、跨液滴尺度、多液滴、平面和曲面、开放和封闭体系的精准灵活、自适应液滴操控；并在此基础上，我们进一步拓展了液滴操控在液滴机器人、液滴收集、材料制备，及生化诊断分析等领域应用[1-3]。

参考文献：

1. L. Zhang, P. Naumov, X. Du, Z. Hu, J. Wang, Adv. Mater., 2017, 29(37), 1702231.
2. F. Wang, M. Liu, C. Liu, Q. Zhao, T. Wang, Z. Wang, X. Du, Sci. Adv., 2022, 8, eabp9369.
3. F. Wang, M. Liu, C. Liu, C. Huang, L. Zhang, A. Cui, Z. Hu, X. Du, Natl. Sci. Rev., 2022, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac164>.

D18-O-12

受蜻蜓翅膀微结构启发的强韧型光控快速修复材料

傅佳骏*

南京理工大学化学与化工学院

受到生物体能够自主修复自身结构、性能和特定功能的启发，研究人员已开发出了一系列基于超分子相互作用(如氢键、配位键、离子键等)的本征自/可修复聚合物材料。由于非共价相互作用在分子层面能够可逆地断裂结合，该类材料不仅能够修复本征机械性能，而且其还能修复自身原有的功能，如导电、传感、抗腐蚀等。最近，研究人员专注于开发具有高强度、高硬度的可修复材料，这类材料在智能建筑、航空航天、汽车工业等高科技领域具有广阔的应用前景。然而，目前报道的基于超分子相互作用的刚性可修复材料都表现出脆性断裂的特征，这会导致材料在使用过程中出现灾难性的断裂，从而引发严重的安全事故。

为了解决上述问题，本团队通过复合材料定构加工的思路，在“硬而脆”的可修复聚合物基体中植入三维互联的仿蜻蜓翅膀微结构刚性骨架，解决了材料脆性断裂的问题。与初始的材料相比，制备的仿生复合材料的综合力学性能具有显著提升；其模量提高了3.8倍，强度提高了25.0倍，应变提高了7.9倍，断裂韧性则提高了54.3倍。此外，制备的仿生复合材料还具有快速的光控可修复性能、优异的热稳定性以及良好的电磁屏蔽能力，是一种多功能集成的强韧可修复复合材料，在军事领域具有广阔的应用前景。

本论文研究工作获得国家自然科学基金、江苏省自然科学基金、KJW基础加强领域基金项目、装发

预研项目、中央高校基础研究基金等项目支持。

D18-O-13

仿生特殊浸润性功能膜层构建及其多相分离与催化净化应用

赖跃坤*

福州大学石油化工学院,福建清源创新实验室

二氧化钛依然是各种纳米材料中研究最广泛和活跃的半导体功能材料之一。二氧化钛维度结构、复合结构等结构设计或是晶面调控、结构调控、能带结构等方面调控对纳米结构材料在光电、光催化太阳能燃料合成、传感器、生物医药等方面都具有潜在应用前景。浸润性是功能半导体催化表面一个非常重要的性质,自然界中有诸多神奇动植物具有特殊浸润性,因而仿生特殊浸润性构建开发一直是科学家们追求模仿目标。仿生特殊浸润性调控构建是一种涉及材料科学、物理化学、表界面科学和催化科学等众多科学分支的交叉学科和综合技术,在绿色能源开发和可持续性环境保护等方面发挥了不可或缺的作用。报告人结合自身的研究经历,主要报告围绕二氧化钛基纳米功能材料的仿生特殊浸润性设计研发及其在能源化工与环境化工领域应用,特别是多相分离和催化净化领域。

D18-O-14

超过 200 °C 的宽温域蓝相激光器

王京霞*

中科院理化技术研究所

蓝相液晶(BPLCs)激光器在传感器、显示器和防伪领域具有潜在的应用。由于 BPLCs 窄的温度窗口,其相应激光器的工作温域大概在 3-4 °C。聚合物稳定蓝相(PSBP)体系的采用已极大拓宽了蓝相液晶的温度窗口至 500 °C,但目前所报道的蓝相激光器的最宽工作温域不超过 36 °C。“蓝相液晶温域”与“蓝相激光工作温域”的大差异可能与所用 PSBP 体系的低聚合液晶组分<10 wt%导致其差的结构稳定性有关;而 BPLCs 带隙与荧光信号在温度变化过程中的不匹配性也限制了新颖蓝相宽温域激光器的发展。

为解决上述问题,我们在前期工作中制备了宽温域(-190°C~360°C)的聚合物稳定蓝相液晶^[1];通过调节蓝相液晶带隙中心、染料有序度参数、谐振腔质量及泵浦光能量,在染料掺杂蓝相液晶中实现了可控的单、双、三及四模面发射激光^[2]。在这个工作中^[3],我们通过调控 PSBP 中可聚合液晶单体含量(30 wt% C6M),形成了稳定的蓝相聚合物支架,将该 PSBP 体系掺杂染料后,获得了超过 200 °C 的宽温域蓝相液晶激光器(25-230 °C)。该研究表明了宽的 BP 激光温域源于所用稳定的聚合支架体系,其保证了整个激光温域范围内反射带隙与荧光信号的匹配性;而体系中的非聚合组分在变温过程中产生相变(25.0-67.5 °C: 蓝相与微量胆甾相共存; 67.5-72.2 °C: 蓝相体系; 72.2-230.0 °C: 蓝相与微量各向同性共存)又赋予了该 BP 激光器可重构的性能:激光阈值随温度呈 U 型变化、可逆的激光波长及在相变点(约 70 °C)明显的激光增强效应。此外,还原位表征了变温过程中反射信号、荧光信号、量子效率、荧光寿命、POM 及 Kossel 结构,对其宽温域激光发射做出了合理的解释。这项工作为新型多功能有机光学器件提出了重要见解。

参考文献:

[1] Jingxia Wang, et al. *Nat. Commun.* 2021, 12 (1), 3477.

[2] Jingxia Wang, et al. *Adv. Mater.* 2022, 34 (9), 2108330.

[3] Jingxia Wang, et al. *Adv. Mater.* 2022, doi.org/10.1002/adma.202206580.

D18-O-15

仿生液体绕流材料

董智超*

Technical Institute of Physical and Chemistry. CAS

液体在固体表面的传输是界面化学研究的重要内容之一。在液体可控传输的研究中，“绕流”是很重要的一种类型，它是指固体和连续流体之间存在相对运动时，流体的运动具有依附于固体表面的趋势，从而其运动方向在固体的弯曲面或边缘处沿着固体的表面发生弯折的情况。绕流现象在日常生活中是一种常见的现象：大到消防水枪、农业灌溉的水柱喷射，小到微流体芯片、3D 打印过程中的液体输运都普遍存在绕流现象。深入理解绕流现象的规律，特别是固体表面曲率结构和浸润性对它的影响，对于这些应用领域可能带来重要的影响。在此次报告中，报告人结合已开展的工作对动态绕流的调控方法进行系统的报告，重点介绍：边缘限域液体定向传输、曲率增强毛细效应实现自虹吸和高斯曲率反转促进液体快速驱离的绕流调控新方法。

D18-O-16

Bioinspired Composite Optical Structure Materials

Mingzhu Li*

Key Laboratory of Green Printing, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences

Controlling the interaction between light and matter through optical structures has laid the foundations for a broad spectrum of applications, ranging from colors, lasers, and optoelectronics, to quantum information processing. To design and fabricate optimum optical structures towards highly efficient light management has been of growing interest.

Inspired by the natural hierarchical optical structures, we developed a series of composite optical structure materials with a low spatial footprint and enhanced light-matter interaction. [1-5] Deep-strong coupling of different optical structures, such as Fabry-Pérot interferometers, distributed Bragg reflectors, photonic crystals and grating structures, unlocks a large variety of novel phenomena spanning traditionally distant research areas. Moreover, we emerge composite optical structure materials with surface-functionalization, chemical regulation, and optoelectronic device which open prospects for diverse applications, including anti-counterfeiting, encryption, sensing, displays, photovoltaics and imaging.

References

- [1] Z. Zhang, F. Vogelbacher, J. De, Y. Wang, Q. Liao, Y. Tian, Y. Song, M. Li*, Directional laser from solution-grown grating-patterned perovskite single-crystal microdisks, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, e202205636.
- [2] K. Li, T. Li, T. Zhang, H. Li, A. Li, Z. Li, X. Lai, X. Hou, Y. Wang, L. Shi, M. Li*, Y. Song*, Facile full-color printing with a single transparent ink, *Sci. Adv.* 2021, 7, eabh1992.
- [3] X. Lai, Q. Ren, F. Vogelbacher, W. E. I. Sha, X. Hou, X. Yao, Y. Song, M. Li*, Bioinspired quasi-3D multiplexed anti-counterfeit imaging via self-assembled and nanoimprinted photonic architectures, *Adv. Mater.* 2021, 33, e2107243.
- [4] X. Lai, J. Peng, Q. Cheng, A. P. Tomsia, G. Zhao, L. Liu, G. Zou, Y. Song, L. Jiang, M. Li*, Bioinspired color switchable photonic crystal silicone elastomer kirigami, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021, 60, 14307-14312.
- [5] Y. Zhan, Y. Wang, Q. Cheng, C. Li, K. Li, H. Li, J. Peng, B. Lu, Y. Wang, Y. Song, L. Jiang, M. Li*, A butterfly-inspired hierarchical light-trapping structure towards a high-performance polarization-sensitive perovskite photodetector, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2019, 58, 16456-16462.

D18-O-17

仿生非光刻图案化技术

于严湙*, 李春, 王皓川

南方科技大学材料科学与工程系

随着集成电路制程进入亚 10 nm 节点，栅极介电层制造中对多次光刻工艺的套刻精度要求已经逼近极限，给晶体管进一步微缩和三维集成带来严峻挑战，迫切需要可以替代多次光刻技术的图案化新方法。本报告将介绍一种仿生非光刻图案化制备技术，创新引入液封理念，显著提升非光刻掩模版材料的图形化分辨率，结合原子层沉积技术，实现多种介电氧化物薄膜的高精度非光刻图案化制备。

D18-O-18

仿生超浸润油水分离材料的构建及性能研究

李健*、项斌、公静玲

西北师范大学

频繁的溢油事件和各种工业过程中产生的大量含油废水对人类的正常生产和生活以及周边生态环境造成了前所未有的危害，这使得油水分离成为了世界性的挑战。课题组利用材料表面对油和水不同的浸润性，制备了一系列油水分离材料。针对膜分离领域分离效率和通量此消彼长的“Trade-off”效应，受沙漠甲虫“空气中集水”性能的启发，首次构建了一种与沙漠甲虫结构相似但浸润性能相反的油水乳液分离膜，该膜由凸起的疏水/亲油 ZIF-8 颗粒和底层的水下超疏油 PAN 纤维膜组成。在分离水包油乳液时，凸起的疏水/亲油颗粒能够实现“水中集油”而底层的水下超疏油材料对乳液起到筛分作用，成功地实现了表面活性剂稳定的水包油乳液甚至水包原油乳液的高效和高通量分离。在此基础上，揭示了“捕获-聚集-分离”的强化分离机理[1]。针对油水混合物不能按需和高效分离的问题，受“阴阳平衡”启发，提出了普适性制备水下超疏油和油下超疏水油水分离材料的新策略。选取 APT, TiO₂ 和黄土为研究对象，采用精确控制表面化学的方法，系统分析和讨论了超浸润现象的设计原理，从而证明通过亲-疏水混合喷涂可以成功制备出在油水系统中实现双重超疏液的表面[2]。针对大多数油水分离材料浸润性单一，只能分离单一类型的油水乳液等问题。通过采用自底向上的方法制备得到具有不对称浸润性的 Janus 纳米纤维膜可处理不同类型的油水乳液，并且不对称性质可以在分离过程中提供内在驱动力，从而提高分离过程的能量效率[3]。这些油水分离材料都是极其容易获得的，并且具有制备简单、低成本、环境友好等优点，拥有良好的应用前景。

关键字 仿生；油水分离；水下超疏油；油下超疏水；分离效率

D18-O-19

基于凋亡小体包覆酶响应荧光多肽-纳米金复合物的仿生探针检测细胞内金黄色葡萄球菌

宋尔群*, 杨芸

西南大学药学院

由于病原体入侵至宿主细胞内存活后，可抵抗抗生素治疗，使其在宿主体内长期定植，充当“特洛伊木马”形成二次感染灶，从而导致复发性全身感染。因此，快速地检测细胞内细菌对指导感染性疾病治疗具有重要意义。本研究以凋亡小体包覆特异响应 Caspase-1 的荧光多肽-纳米金复合物构建多功能仿生荧光共振能量转移（FRET）信号探针，用于检测细胞内金黄色葡萄球菌。该探针递送至金葡菌感染性细胞内，在胞内水解酶和酸环境的共同作用下释放 FRET 信号探针。金葡菌感染性细胞内 Caspase-1 剪切 FRET 探针的多肽使得该探针解组装进而点亮荧光信号。本研究基于凋亡小体包覆的仿生 FRET 探针检测细菌，不仅避免了胞外细菌对胞内细菌检测的干扰，同时由于凋亡小体的同源性大大增强了细菌感染性宿主细胞对信号探针的摄取，有利于增强检测信号进而提高分析的灵敏度。研究结果表明，该方法可在 1 h 内实现对巨噬细胞内细菌的快速检测，对于指导细菌感染的治疗具有重要意义。

D18-O-20

手性无机纳米功能材料

庄涛涛*

中国科学技术大学

作为一种新型手性物质，手性无机纳米材料因其尺寸效应、以及较强的光-物质相互作用，在圆偏振光电、手性识别、生物标记检测、信息加密防伪量子计算等应用领域都展现出特殊的应用价值。

本报告汇报内容：我们基于开发的“双缓冲层介质”胶体合成技术，构筑了一类新型一维磁光半导体手性纳米结构；进一步发展纳米材料组装技术构建螺旋组装体结构，增强无机材料的光学活性与圆偏振发光特性；利用合成的新型手性无机纳米结构，在信息加密防伪、3D 显示等方面实现材料功能化。

D18-O-21**仿生气体浸润机制与应用研究**

于存明*

北京航空航天大学

气体在固/液/气或固/液/液复合界面的浸润行为，涉及能源、环境、生命健康、流体减阻等重大基础前沿科学与国防技术领域，例如电催化绿氢生产、沸腾传热、污水处理、超声诊断、药物输运、潜艇减阻等。今年来，主要围绕气体浸润机制与应用开展系统工作，从生物表面多尺度微观结构、化学组成与气体浸润机制之间的构效关系出发，克服气体扩散、静水压、低表面能环境等诸多因素限制，揭示了气体在固/液/气、固/液/液复合界面的浸润机制，实现了界面气泡的智能操控，并开展了气体浸润性在电解水、污水处理、水下气体微反应等领域的应用研究。

关键字 仿生；气体浸润性；流体输运；电解水

D18-K-02**仿生材料设计与制备的机遇与挑战**

俞书宏*

中国科学技术大学

自然界中存在着大量结构精美、性能卓越的生物矿物材料，诸如珍珠母、牙齿、骨骼等。这些生物材料通常是由生物体在相对温和的条件下，利用周围环境中有限种类的物质资源，通过矿化生长的方式制造的一类高度结构化的纳米复合材料。通过模拟生物材料的跨尺度结构和合成路径，进行人工结构材料的多尺度设计与精准制造，一直是无机化学、纳米科学、材料科学、生命科学、工程科学等领域交叉研究的前沿热点。本报告将围绕这一国际研究热点，总结近年来该领域发展的典型跨尺度仿生结构设计方案和构筑方法，例如仿生矿化、生物合成法，定向冷冻、磁场诱导、3D 打印等取向组装法等，分析这些方法的特点与优势，同时将展示如何通过结合各种先进表征手段和跨尺度理论模拟技术来揭示这些仿生材料的结构-性能关系。最后，报告将从仿生原理提取、跨尺度仿生结构的高效精准构筑以及仿生材料的构效关系分析等方面展望仿生材料领域面临的主要机遇与挑战。

D18-I-07**仿生手性光子晶体**

唐智勇*

国家纳米科学中心

自然界中，甲虫角质层具有明亮的彩虹色，这是源于生物纤维形成了复杂的纳米级周期性结构。在

过去的几年里，我们发展了一种以 Langmuir-Schaefer 组装无机胶体纳米线，制备仿生手性光子晶体的通用方法。我们不仅重现了甲虫生物体复杂的螺旋结构和圆偏振反射颜色，而且获得了手性无机纳米结构中最高手性活性，其不对称因子为-1.6。更重要的是，在自然之外，基于精准层层组装的可编程结构控制赋予了我们前所未有的自由度，可以准确调控制备的手性光子晶体的光学活性，例如，高强度圆偏振发光和激光的实现。

D18-I-08

仿生湿电材料与器件

曲良体*

清华大学化学系

能源短缺和环境污染问题日益严峻，绿色清洁能源的开发为有效解决这些问题提供了新的途径。将自然界中的清洁太阳能、热能、机械能等转化为电能，人们已经开发出太阳能电池、热电、摩擦产电、压电等新型能量转化材料和器件。相比之下，自然界大气中的水汽无处不在，基本不受环境因素的限制；水汽的自发扩散行为蕴含着巨大的能量，但却很少有人对其能量的有效转化与利用进行研究。近年来，基于仿生理念，我们团队通过对石墨烯、高分子等材料进行系统的调控改性，开发出水汽诱导直接产生电能的材料体系与器件；目前利用水汽诱导产电器件可产生高达数十伏甚至上千伏的电压，能够为商用电子元器件进行供电。相关研究成果为认识水汽能量转化过程，进而利用水汽诱导能量产生，作为清洁能源开辟了新的路径。

D18-O-22

人牙适配型仿生义齿材料设计、制备与性能研究

刘增乾^{*1,2}、谈国旗^{1,2}、张哲峰^{1,2}

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学

义齿用于替代缺损或缺失的牙齿，对于保障正常的口腔功能至关重要。氧化锆陶瓷及其复合材料是目前广泛应用的义齿材料，然而其硬度与模量过高、脆性大、难加工，并且会明显加速正常牙齿损伤。本工作通过模仿天然贝壳的微观结构，并建立模量预测的力学模型指导结构设计，研制了硬度、模量均与人牙适配的新型陶瓷-树脂仿生义齿材料。该材料具有良好的断裂韧性和耐疲劳性能，其疲劳极限超过牙齿最大咬合应力，仿生结构通过促进微观“台阶式”断裂机制阻碍裂纹扩展，并且表现出低于氧化锆的摩擦系数，本身不易磨损且不会明显磨损人牙。此外，仿生材料无细胞毒性，与种植体之间粘接牢固，并且易于加工，可利用 CAD/CAM 方法在医院现场制作，从而降低加工成本并缩短患者等待时间。在此基础上，本工作开发了新型连续式冰模板工艺与陶瓷坯体累积叠轧工艺，为仿生义齿材料的规模化稳定制备奠定了基础。与其他义齿材料相比，仿生材料与人牙的硬度和模量适配度更高、加工性能更好、断裂韧性更优异，并且兼具优异的服役性能，因此具有可观的应用前景。

D18-O-23

仿生三相界面催化

封心建*

苏州大学材料化学与化工学部

有气体参与的固-液界面催化反应，比如光催化、氧化酶催化反应等在能量转换、健康监测诸多方面有着广泛应用。但由于气体在溶液中溶解度低、扩散速度慢，严重抑制了催化反应效率及相应器件性能。

自然界中许多生物体表面通过微纳米结构与表面能的协同作用而呈现超疏水性，当和水溶液接触时会形成固/液/气三相共存的界面。这一特性为人们设计具有储气功能的反应界面，解决催化反应动力学受限问题提供可能。我们提出了利用微结构和润湿性的协同效应来构筑三相反应界面微环境的研究思路：亲水的上表面和溶液可以充分浸润，有利于界面电荷转移；疏水的侧面可以阻止溶液进入基底，有利于气体的富集和到界面的快速传输。基于该三相反应界面体系，系统研究了有氧气参与的电催化、光催化、氧化酶催化等反应，在大幅提升催化反应性能的同时，发展了具有自主知识产权的富氧广谱高效酶生物传感新技术。

D18-O-24

仿生抗冻分子及应用研究

张雷*

天津大学化工学院生物化工系

低温环境会使水结冰从而导致低温损伤，是细胞治疗、器官保存等领域面临的共性难题。自然界存在着许多能够耐受严寒的生物，因为它们含有能降低冰点、抑制冰晶生长等的亲水抗冻生物分子。因此，我们研究了其分子结构和功能，挖掘了关键功能模块，设计开发了一系列抗冻保护试剂和材料，并深入研究了其对水结冰及低温损伤的影响。利用具有降低冰点的天然渗透压调节分子与仿生抗冻分子协同，可有效保护细胞在超低温冻存环境下免受冰晶损伤和渗透压损伤，实现多种治疗性细胞（包括干细胞、免疫 T 细胞、软骨细胞、红细胞等）的长期高效保存。新型冻存保护剂生物相容性和冻存保护效果突出，有望替代当前使用的具有毒副作用的二甲基亚砜、甘油的“金标准”保护液。同时，还设计了仿生抗冻分子，开发了可在极端低温条件下自主愈合的抗冰涂料及抗冻包埋材料，为多种低温环境应用提供了有效抗冻保护方法。

D18-O-25

贻贝仿生与固体表面高分子程控黏附

袁丛辉*, 戴李宗*

厦门大学材料学院

邻苯二酚基聚合物代表着黏附性高分子的一个前沿发展方向，是人类模仿自然界贻贝类生物进行高性能黏附性材料设计的成功案例。基于配位、氢键、 π - π 堆叠、静电作用等协同的界面相互作用机制，邻苯二酚基聚合物可对各类干、湿表面产生强黏附性能，但依然存黏附强度、黏/脱黏循环转变难以控制等系列难题。我们将邻苯二酚基聚合物转化为硼酸酯聚合物，设计新型电控黏附性水凝胶，采用动态硼酸酯键管控黏性因子邻苯二酚基团，解决以上难题。电控黏/脱黏的机理在于：水凝胶与导电基体界面处电解水，调控表面 pH，诱导硼酸酯键可逆断裂和成键，程控邻苯二酚基团的暴露和屏蔽，实现电控黏/脱黏。所设计的硼酸酯聚合物水凝胶在 3.0-4.5 V 的电刺激下，1-5 s 的刺激时间即可产生高黏附性能，黏附强度变化为 20-30 倍，适用于不锈钢、碳纸、ITO 玻璃、Al、Cu 等各类导电基体，100 个黏/脱黏循环后，黏附强度下降不明显，循环稳定性良好。将电控黏/脱黏水凝胶引入到攀爬性机器人，实现了步行机器人、轮式机器人在倒置平面、垂直平面的程控攀爬，为机器人的攀爬运动提供了一种全新模式。在此基础上，采用“水凝胶+电极”一体化的设计思路，实现了水凝胶在塑料、橡胶和木头等各类不导电表面的程控黏/脱黏；立足分子结构设计，制备了网络结构刚柔并济的硼酸酯聚合物水凝胶，有效解决了水凝胶在水下（去离子水、海水）中的稳定性问题，实现了水凝胶在水下环境中对基体的电控黏/脱黏，并应用于水下物体搬运。电信号的强度、方向、频率精准可控，我们所开发的贻贝化学与电化学相结合的材料黏附性能控制方法，可为机器人攀爬、程控抓取、智能感知提供新的实现途径。

D18-O-26**受生物启发的抗粘附界面材料**

孟靖昕*

中国科学院理化技术研究所

自然界中，存在着许许多多有趣的抗粘附现象。通过研究生物体独特的抗粘附行为，不但有助于我们深入的理解其抗粘附机理，而且能够指导我们发展新型抗粘附界面材料。近年来，我们研究了几种典型的抗粘附现象，并受此启发设计了多种仿生抗粘附界面材料，实现了对细胞、油污、以及水垢抗粘附。例如：1) 受免疫细胞结构的启发，制备了系列仿免疫细胞结构捕获界面材料，实现了癌症的高灵敏诊断；2) 受贝壳抗油粘附特性启发，制备了兼具透明以及耐磨性能的水下超疏油、低粘附的矿化涂层，可用于制备水下观测的透明视窗；3) 受肾上皮细胞表面抗结石的启发，制备了表面具有超亲水性纳米纤毛状凝胶的涂层结构，实现了对矿物的高效抗粘附特性。

D18-O-27**牙齿表面缺损自愈性修复的过去、现在和未来**

曹颖*, 李全利

安徽医科大学口腔医学院/附属口腔医院

龋齿是目前全球范围内最主要的公共卫生问题之一，目前采用人工材料进行修复是世界性的治疗资源负担(WHO)。第四次全国口腔健康流行病学调查结果显示我国的口腔健康教育医疗维护的任务相当繁重。在龋病病损早期，逆转牙体病损进程，启动牙体组织在口腔环境中的再矿化自愈性潜力，诱导牙体病损的自愈性修复一直是口腔疾病防治研究的前沿。牙体组织的再矿化已有 100 多年的历史，现在临床上使用的再矿化制剂已经可以初步实现牙釉质的再矿化，但在牙本质再矿化方面表现不佳，现有的临床研究相关的文章也缺乏严格的临床随机对照试验研究。通过开展生物矿化研究，人们借鉴自然开展大量的仿生制备，发现一系列非经典晶体生长现象。我们近期工作仿生牙齿发育的生物矿化过程和海洋贻贝生物粘附机理，发展了一系列的非细胞生物策略的牙体组织仿生矿化技术，初步实现了在实验室、动物体内的牙齿结构再生与自愈性修复。针对致龋菌占优导致的口腔微生态失衡，构建釉质靶向分子和多功能靶向抗菌肽的纳米载体，研发分子仿生矿化技术，并将其精准递送至患牙表面，实现矿化活性分子与牙体组织靶向、智能感知口腔环境变化、抗菌并摄取唾液钙磷，启动矿化沉积、诱导牙体组织微结构再生，实现早期牙体组织病损的自愈性修复。针对牙体组织的实质性缺损，分别构建 1D、2D 微观类釉质材料，通过有机/无机粘结介质，以及物理化学手段实现 3D 釉质块材的宏观组装，探索其临床应用转化，实现牙体组织缺损的仿生修复，为龋齿防治提供的一种新的安全无创的治疗方法。

D18-O-28**基于天然结构的能源-水处理材料与器件：从直接利用到仿生设计**

陈朝吉*

武汉大学资源与环境科学学院

在多尺度结构设计上，大自然无疑是大师。特别是广大植物及动物中生物合成的天然结构赋予其优异的性能和功能。这些优美的天然结构对功能材料的开发，乃至人类社会的发展至关重要。特别是在能源转化/储存和水处理领域，天然结构一方面可以被直接利用于这些器件，提供优异的性能；另一方面，受天然结构启发，人们设计了具有仿生结构或者功能的这类器件，同样获得了优异的性能。本报告将结合报告人过去的研究工作，探讨天然结构在能源转化/储存和水处理领域的应用，特别是基于天然结构的能源-水处理材料与器件的设计。报告首先讨论天然结构中的常见的分级结构及设计原则，进而以这些独

特的天然结构与能源-水处理材料和器件中的多物相传输相结合，探讨如何在能源-水处理材料和器件中直接利用这些天然结构和以这些天然结构为仿生设计源泉构筑人工分级结构，并进一步探讨结构-性能-功能之间的构效关系，以此指导高性能能源-水处理材料和器件的设计。

D18-O-29

基于仿生微纳孔材料的能源传感体系

张振*

中国科学技术大学苏州高等研究院

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精妙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-O-30

PμSL 微尺度 3D 打印技术及其在仿生材料的应用

彭瑛*

深圳摩方新材料科技有限公司

师法自然，微观的结构赋予动植物特殊的性能及功能。同样的，复杂的微尺度结构赋予器件各式各样的功能性。实现复杂的微尺度结构的加工，则是仿生研究的一个重要课题。如何高效、低成本的实现复杂三维微结构的制备，尤其是宏观样件具有精细微观结构的制备，其难度极大，也是学界和业界致力攻克的一项难题。面投影微立体光刻技术，即 Projection Micro Stereolithography (PμSL) 微尺度 3D 打印技术，因其快速一体化成型高精度、跨尺度复杂三维微结构，备受业界和学界的青睐。摩方精密公司凭借其特色的 PμSL 3D 打印技术，开发出一系列高精度（最高光学精度 2μm）的 3D 打印系统，可加工出各种复杂微米三维结构，在诸如超材料、仿生、微流控、新能源、新材料等众多领域取得了系列成果。本次报告将重点分享 PμSL 3D 打印技术在仿生领域的成果，包括仿南洋杉锯齿结构、仿生多槽刺结构、仿生多孔模结构等。

D18-I-09

仿生自分泌海洋防污体系的构建

潘健森，谢庆宜，马春风，张广照*

华南理工大学

海洋生物污损是指海洋微生物、动物和植物在船体等设备表面吸附、生长和繁殖所形成的生物垢，它对海洋工业和海洋活动有深刻的影响。人们发现一些海洋生物(如鲨鱼、海豚和部分藻类等)由于其天然防御机制能有效抑制污损生物的附着。在本工作中，我们模仿海洋生物表皮自脱落和自分泌活性抗污分子的行为，构筑聚乳酸基聚氨酯树脂(PLA-PU)和天然产物防污剂丁烯酸内酯的防污体系。在该体系中，PLA-PU 在海水中通过降解形成自更新的动态表面，并使丁烯酸内酯持续可控释放，二者协同作用下材料具有优异的防污效果。数字全息显微镜表明该体系可抑制污损生物的粘附，而非杀灭污损生物。此外，PLA-PU 在海水中均可降解为无毒小分子，体系生态友好。体系所用聚乳酸为生物基材料，丁烯酸内酯源自海洋细菌，体系“取之自然，用之自然”。该体系有望在海洋防污中应用。

D18-I-10**2D and 3D Tetrapyrrole-based Functional Materials: Preparation and Applications**

Jianzhuang Jiang*

University of Science and Technology Beijing

A series of 2D and 3D tetrapyrrole-based functional materials have been designed and synthesized, including porphyrin-based covalent organic frameworks, phthalocyanine-based covalent organic frameworks, phthalocyanine conjugated polymers, and mixed phthalocyanine-porphyrin-based conjugated microporous polymers. These tetrapyrrole-based materials exhibited excellent oxygen reduction reaction catalytic activity, photocatalytic CO₂ Reduction activity, and sensing performance. In particular, the well-defined chemical composition and the unambiguously identified structure of the active sites for these tetrapyrrole-based materials enabled to gain an in-depth understanding of the structure-function relationship.

References

- [1] Liu, W.; Li, X.; Wang, C.; Pan, H.; Liu, W.; Wang, K.; Zeng, Q.; Wang, R.; Jiang, J. J. Am. Chem. Soc. 2019, 141, 17431-17440.
- [2] Han, B.; Ding, X.; Yu, B.; Wu, H.; Zhou, W.; Liu, W.; Wei, C.; Chen, B.; Qi, D.; Wang, H.; Wang, K.; Chen, Y.; Chen, B.; Jiang, J. J. Am. Chem. Soc. 2021, 143, 7104-7113.
- [3] Han, B.; Jin, Y.; Chen, B.; Zhou, W.; Yu, B.; Wei, C.; Wang, H.; Wang, K.; Chen, Y.; Chen, B.; Jiang, J. Angew. Chem. Int. Ed. 2022, 61, e202114244.

D18-I-11**建立生物医学新认知的材料仿生研究**

唐睿康*

浙江大学化学系

围绕生物矿化介绍学科交叉及全链条创新，突出基础学科原创新概念孕育变革性新技术，面向材料、生物和医学等学科将传统认知中的众多“不可能”变为“可能”。报告沿着“材料仿生合成”和“材料调控生物”两条主线展开：在学习生物如何制备材料过程中产生了“无机颗粒融合”与“无机离子聚合”原创突破，能“像制造塑料一样可塑地制备无机材料”，创制出系列新概念材料，还进一步结合仿生矿化发展出牙釉质再生等生物医学新策略，颠覆“牙釉质不可再生”的传统医学认知，为生物硬组织的修复及未来生物材料产业发展提供新方向。在学习生物如何使用材料过程中开辟“材料调控生物”交叉研究新前沿，突出材料对生命过程的调控作用，通过材料与生物的装配和功能复合实现“常温疫苗”“通用红细胞”以及“肿瘤矿化治疗”等应用，开辟了材料层次的化学生物学调控研究新领域，为新型疫苗研发和退行性疾病治疗领域提供了全新的科学基础，进一步促进化学、材料和生命科学的相互交融。

D18-O-31**胶原纤维限域空间材料合成及微结构调控**

平航*、傅正义

武汉理工大学

天然骨骼形成是一个典型的生物制造过程。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，形成特殊结构使得骨骼具有优异的力学与功能特性。受骨骼结构形成过程的启发，我们对胶原纤维内限域合成材料开展了系统性的工作，实现了氟化钙纳米晶体在胶原纤维内的周期性有

序合成与结晶，揭示了限域空间内新材料结构形成动力学规律；实现了碳酸锶晶体在胶原纤维内的沉积，制备了基于矿化胶原纤维的压电功能材料；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。上述工作不仅为理解生物质形成过程往前迈进了一步，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-O-32

仿生微纳限域固液复合材料

盛智芝*

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

生物体中存在各种各样的多孔结构，将液体引入孔中作为一种表界面材料来实现抗污、节能、自修复、自适应等丰富的性能。受到自然界的启发，我们开展了一系列基于微纳米多孔限域功能液体的固液复合材料研究。微米限域固液复合材料主要关注液体界面的智能开关和流体传质行为，重点探索在多相分离、流体输运、物质检测等领域的应用；纳米限域固液复合材料主要关注纳米多孔对液体的捕获与释放，研究其传质与传热行为，重点探索其在空气取水、能源管理、微波吸收及智能织物等方面的应用。近期，针对“石墨烯片层垂直面高效传质调控”的科学问题，我们通过氧化造孔开发了打孔石墨烯气凝胶纤维，并在石墨烯片层结构中构筑吸湿位点，进一步通过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和吸附动力学、传质和传热机理、以及石墨烯气凝胶纳米限域固液复合材料与电磁波的相互作用机理，不仅实现了宽湿度范围内高效的水捕获，而且展现了吸附式制热/制冷应用和宽频的微波吸收性能。

参考文献：

1. Zhizhi Sheng#, Honglong Wang#, Xu Hou*, et al., Liquid Gating Elastomeric Porous System with Dynamically Controllable Gas/Liquid Transport, Science Advances, 2018, 4, eaao6724.
2. Zhizhi Sheng, Xuetong Zhang*, et al., Solid-Liquid Host-Guest Composites: the Marriage of Porous Solids and Functional Liquids, Advanced Materials, 2021, 33, 2104851.
3. Yinglai Hou#, Zhizhi Sheng#, Xuetong Zhang*, et al., Hygroscopic Holey Graphene Aerogel Fibers Enable Highly Efficient Moisture Capture, Heat Allocation and Microwave Absorption, Nature Communications, 2022, 13, 127.

D18-O-33

肽基生物纳米材料用于肿瘤诊断与治疗

张路*

南方科技大学生物医学工程系

据数据统计，癌症已取代心血管疾病成为多个国家人口死亡的首要原因。针对临床癌症精准成像诊断和高效治疗面临的难题，课题组围绕“生物医用纳米材料活体仿生组装、结构调控与癌症诊疗的关系”科学问题进行系统研究，扎根化学、材料、生物、医学和工程交叉学科研究前沿，选用生物相容性好、人体安全性高的多肽或聚氨基酸为基础生物材料，围绕以下三个方面开展工作：纳米药物精准递送、活体原位仿生自组装、纳米药剂临床转化应用，解决如何将纳米药更精准、更高效、更灵敏地送到癌症病灶部位，并且在癌症病灶部位，基于仿生材料自组装形貌转变，提升纳米药物及材料的体内生物利用度，最终推进纳米药剂的临床转化应用研究。

D18-O-34

碳基能源材料的仿生设计及界面能质输运调控

李猛*

重庆大学

在我国“十四五”能源规划和“双碳”的目标背景下，以各类纳米碳材料为基础的新能源应用研究已经成为国内、国际重要的研究前沿，但其在能源领域的应用仍广泛受制于有限的结构设计、复杂的制备工艺及“材料-工程”的协同方法。仿生学是 20 世纪生物科学与技术快速发展中产生的一门新兴交叉学科，面对碳基新能源转化与储存过程中的挑战，仿生技术和新能源的结合催生着无限的发展可能。报告人自 2018 年起尝试碳基仿生思路解决新能源转化及储存过程中的问题，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一系列研究工作，通过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，阐释了碳基材料的仿生策略与“功能仿生”作用机理，明确了材料仿生设计与内部能质传递与转换协同的研究方法。为能源转换及储存中的光热利用、水系离子储能及电解水制氢等前沿科学问题提供新的解决思路。

D18-O-35

A bioinspired broadband self-powered photodetector based on photo-pyroelectric-thermoelectric effect able to detect human radiation

Junlong Tian^{*1}, Liu Sixiang², Zhang Wang³

1. Guizhou University

2. Xiangtan University

3. Shanghai Jiao Tong University

The self-powered broadband photodetectors based on pyro-phototronic effect or photothermoelectric effect are promising for diverse applications. Here, we propose a polar bear-inspired self-powered and uncooled broadband photodetector based on the coupled effect of pyro-phototronic and photothermoelectric effect, which integrates wurtzite structured CdS pyroelectric-thermoelectric materials with energy-harvest and heat-storing functional structures, besides cooperates with asymmetric Schottky junction by constructing an asymmetric pair of Ag electrodes. The peak-to-peak current, specific responsivity and detectivity are all enhanced by 11 times, attributed to the synergy between photopyroelectric effect and photothermoelectric effect. Significantly, for a low-power long-wave infrared radiation, it still achieves outstanding response on human radiation, when the separation between human finger and detector is extended to 10 cm. This study provides a novel design to achieve the synergy of pyroelectric effect and thermoelectric effect, and opens up a new avenue towards upgrading the performance of optoelectronic devices and energy harvesters for extensive applications.

Key words Bioinspired self-powered photodetectors, human radiation sensing, pyroelectric effect and thermoelectric effect

D18-I-12

基于仿生表面的水能关系

王钻开*

香港理工大学

冠状病毒病 (COVID-19) 的爆发让人想起了人与自然和谐共处的重要性。本次演讲的重点是如何寻求自然的准则和灵感，设计与调控材料的表界面拓扑结构以应对水和能源工程等领域的重大挑战。本报告将首先探讨怎样设计表面结构实现液体自主选择扩散方向，以及如何实现自发、定向、快速液体传输。在

应用研究领域，我将讨论如何大规模制造耐磨超疏水涂层，以及探讨在高效冷却（完全抑制 1756 年观察到的莱顿弗罗斯特效应）、高效集水和能量收集等领域的应用。

D18-I-13

仿生器官芯片

赵远锦*

东南大学

器官芯片是近年来出现的新的研究方向。其主要目标是要在芯片上模拟生物体的环境进行细胞、组织和器官的培养，研究并控制细胞在体外培养过程中的生物学行为，从而实现能够模拟生物体环境的器官移植以及药物评价等。在各类器官芯片的研究中，构建具有生物学功能的肝脏、肾脏芯片对药物评估具有重要意义。目前国际上有多组研究组都在进行器官芯片的构建及应用研究。尽管相关的研究取得了一定的进展，然而，目前的器官芯片主要是在芯片中简单的进行细胞培养，其离最终的目标还有很长的距离。究其原因在于，器官芯片是一个复杂的系统，目前面临着细胞的三维培养、器官微血管的构建、微器官功能的再现、以及细胞及代谢过程的在线监测等多个科学和技术瓶颈问题。本团队在近今年中对生物医用材料结构和功能的关系进行了深入设计，并利用微流控技术制备获得了一系列结构功能特异的生物材料，解决器官芯片构建所面临的瓶颈问题。

D18-I-14

仿生医用材料界面工程

计剑*

浙江大学

生物医用植入材料和器械，已成为挽救生命，提高人民的生活质量的关键工具。随着材料学、细胞生物学和再生医学不断交叉，生物医用植入材料正从被动的生物相容向组织诱导再生方向发展。通过对细胞外基质环境的仿生模拟，国内外研究者逐步揭示了材料界面化学组成、界面硬度及生物活性分子复合等因素对于诱导细胞生长和组织再生关键作用。然而，在将组织诱导再生原理应用于植入医用器械功能升级的过程中，依然存在涉及生物医用高分子材料表界面工程的众多挑战。在本报告中，我们将结合仿细胞外基质涂层多因素协同规律研究的难题，介绍我们通过生物信息学技术和界面正交点击技术结合，实现高通量实验和数据挖掘技术互动，高效揭示血管原位再生聚合物涂层的多因素组合效应的研究；结合高生物活性分子涂层工程应用的难题，介绍我们利用界面溶胀非溶剂诱导相分离的方法，实现面对聚合物植入器械的“按需设计”的原位负载生物活性分子的创新研究

D18-O-36

仿生多尺度离子基神经拟态器件

肖凯*

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、植物细胞光合作用都涉及到离子的定向传输。可以说，智能生命的语言是“离子”，而人工智能的语言是“电子”。为了突破智能生命和人工智能信息交流的壁垒，通过向智能生命学习，用仿生的手段构筑无机、有机、聚合物等仿生纳米通道，探究限域纳米空间内可控离子传输的机制，并以此为契机构筑基于离子传输的可穿戴器件、仿生神经元、

脑机接口电极等，最终可实现“人工智能-生物智能”无障碍沟通的目标。

围绕限域空间内的可控离子传输及其应用这一目标，我们在新型固态纳米流体器件的构筑及其离子输运性质的研究，仿生多尺度离子基神经拟态器件的构筑及研究等领域取得一系列研究成果，分别构筑了基于离子传输的仿生二极管、仿生晶体管、仿生离子泵和仿生光电探测器等功能器件，实现了可控离子传输在仿生多尺度离子基神经拟态器件中的应用。围绕这一主题发表共发表论文 50 余篇，包括 Nat. Commun. Sci. Adv., Natl. Sci. Rev., Angew. Chem. Int. Ed., Adv. Mater., JACS 等影响因子大于 15 的 30 余篇。

D18-O-37

仿生通道可控制备与应用探索

王路达*

北京大学

具备高选择性和高渗透性的生物通道对于神经元传导和维持生物体稳态有着至关重要的作用。因此，受生物通道的启发，构建人工仿生通道实现对离子输运的精确控制，对高效分离膜、生物传感和能量转换等领域有巨大的应用潜力。然而，设计和制备仿生离子器件仍是亟待解决的关键难题。鉴于此，课题组基于石墨烯构筑零维仿生通道，提出了解耦（亚）纳米孔制备方法，实现石墨烯等二维材料（亚）纳米孔精确引入，为构建尺寸精确可调的仿生离子通道奠定基础。基于此项技术，分别设计了仿生质子孔和仿生钠离子通道。受到生物质子通道含氮官能团启发，提出一种用于质子交换的氮掺杂石墨烯膜，实现了高质子渗透率和选择性；受生物钠离子通道启发，提出一种 ZIFs/石墨烯复合材料的人工离子器件的设计策略，实现了超高 Li^+ 电导率与极佳 Li^+/K^+ 与 Na^+/K^+ 选择性。利用仿生通道对于特定物质的高选择性和高通量输运特点，课题组进一步探索其在质子交换膜燃料电池、血液透析、精密检测方面的应用潜力，表现出优于商业膜的性能。相关研究为仿生离子器件、传感等领域的发展提供了关键技术和重要研究基础。

D18-O-38

空间选择性纳米孔道构建与单分子电化学测量

应佚伦*

南京大学化学化工学院

单分子行为的核心是通过其识别/运转、电子/电荷传递来完成化学乃至生命过程中最基本的物质、能量和信息的高效可控传输。电化学技术是单分子水平上仿生和掌控信息传输模式最直接和有效的手段之一，其关键在于构建与单个分子空间尺寸相匹配的立体限域测量界面，将单个分子的化学动态信息转化为可测量的时序性电信号。针对这一挑战，本研究通过改造天然细菌外膜通道蛋白，使之内腔多肽折叠形成“非对称立体限域空间”，在孔道内构建了横向不对称静电场，从而在限域空间内诱导单个多肽分子上每一个氨基酸侧链翻转，形成了可测量的特征离子流电信号，建立了单个多肽分子差向异构体序列分辨新方法。这一具有空间选择性的纳米孔道单分子电化学检测方法无需对多肽样品做任何标记等处理，通过肉眼可分辨的电信号即可实时鉴定多肽样品中的低丰度差向异构体，具有极高的手性氨基酸分辨能力及分析效率，以期进一步应用于 DNA / 蛋白 / 糖等单分子测序、单分子精准合成以及疾病检测等方面。

D18-O-39

大面积有机微单晶图案化加工技术

吴雨辰*, 江雷

中国科学院理化技术研究所

基于有机半导体材料的集成器件是下一代柔性芯片、显示器件及可穿戴医疗器件的发展方向。然而由于有机材料无法耐受 CMOS（传统无机集成工艺）的微加工条件，因此有机材料的图案化加工是限制其从基础研究走向实际应用的重要技术瓶颈。液相加工方法条件温和，是解决有机材料微加工的关键途径。然而液体的不可控分割和收缩（即气-液-固三相线的不可控锚定和移动），会导致材料的无序组装。针对这一难题，我们从控制液膜三相线的锚定和移动出发，利用界面微结构和化学修饰的协同作用，诱导连续液膜分割成独立的液桥阵列，使得每一个液桥具有独立的三相线，且其锚定位点和移动方向可精确控制。进一步调控独立液桥的形貌和尺寸，限域诱导结构单元的组装，实现了形貌尺寸可控的大面积图案化阵列制备，为发展高性能有机光电集成器件奠定了基础。

D18-I-15

基于液滴调控印刷制备光电器件

宋延林*

中国科学院化学研究所

围绕纳米材料制备及功能墨滴图案化的基础科学问题，开展了液滴操控印刷自组装与图案化光电器件制备的系统研究，发展了微纳尺度的绿色印刷技术^[1]。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，实现了表界面对液滴动态行为精确调控^[2]。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，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^[3]。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^[4]。利用微模板操控泡沫的演变，克服了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。利用液滴操控纳米绿色印刷微纳制造的优势，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^[5]，为功能器件与微纳芯片的印刷制备提供了新的思路。

参考文献：

- [1] Su, Meng; Song, Yanlin; Printable Smart Materials and Devices: Strategies and Applications., Chemical Reviews, 2022, 122(5): 5144-5164.
- [2] Li, An; Li, Huizeng; Li, Zheng; Zhao, Zhipeng; Li, Kaixuan; Li, Mingzhu; Song, Yanlin; Programmable droplet manipulation by a magnetic-actuated robot, Science Advances, 2020, 6(7): eaay5808.
- [3] Li, Huizeng; Fang, Wei; Li, Yanan; Yang, Qiang; Li, Mingzhu; Li, Qunyang; Feng, Xiqiao; Song, Yanlin; Spontaneous droplets gyrating via asymmetric self-splitting on heterogeneous surfaces, Nature Communications, 2019, 10: 950.
- [4] Huang, Zhandong; Yang, Qiang; Su, Meng; Li, Zheng; Hu, Xiaotian; Li, Yifan; Pan, Qi; Ren, Wanjie; Li, Fengyu; Song, Yanlin; A General Approach for Fluid Patterning and Application in Fabricating Microdevices, Advanced Materials, 2018, 30(31): 1802172.
- [5] Zhang, Zeying; Wang, Huadong; Su, Meng; Sun, Yali; Tan, Shuang-Jie; Ponkratova, Ekaterina; Zhao, Maoxiong; Wu, Dongdong; Wang, Keyu; Pan, Qi; Chen, Bingda; Zuev, Dmitry; Song, Yanlin; Printed Nanochain-Based Colorimetric Assay for Quantitative Virus Detection., Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(45): 24234-24240.

D18-I-16

二维超细纳米蛛网材料

丁彬*

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-O-40

定向微纳多孔 Mg 掺杂 HA 生物活性材料的研究

赵雪妮*、张宇、王鹏飞、郭延宇

陕西科技大学

目的：具有微纳分级结构的多孔羟基磷灰石基陶瓷能够促进血管向内生长、骨细胞增殖分化，以及缺损部位新生骨组织的形成，是理想的骨修复材料。研究制备定向微纳多孔镁掺杂羟基磷灰石（Mg-HA）生物活性材料，使其兼具优异的力学性能和生物学性能。

方法：采用化学气相沉积法在 CF 表面原位沉积 CNT（CNT/CF）。通过热压烧结结合热处理制备定向微纳多孔 Mg-HA。孔道间距 1000、500、300 μm ，单根 CF 造孔的材料分别为 Mg-HA(10-CF)、Mg-HA（05- CF）、Mg-HA（03- CF），单根 CNT/CF 造孔的材料分别为 Mg-HA（10-CNT/CF）、Mg-HA（05-CNT/CF）、Mg-HA（03-CNT/CF）。孔道间距 500 μm ，5 根 CNT/CF 造孔的材料为 Mg-HA（05-5CNT/CF）。对定向微纳多孔 Mg-HA 微观形貌、表面润湿性、孔隙率、抗压强度等物理性能进行了表征。研究了定向微纳多孔 Mg-HA 的体外生物学性能和体内成骨性能。

结论：

（1）以定向排列的 CNT/CF 为造孔剂，通过热压烧结与热处理结合制备了定向微纳多孔 Mg-HA 生物活性材料。850 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后多孔材料孔内壁由纳米孔及少量不规则圆孔组成，纳米孔尺寸为~100nm，圆孔尺寸为~2 μm 。Mg-HA（05-CNT/CF）比 Mg-HA（05- CF）的孔隙率提高了 35.4 %，润湿角减小，有利于细胞的粘附。

（2）当孔道间距为 500 μm ，单根 CF、CNT/CF、5 根 CNT/CF 造孔制备的多孔 Mg-HA 的压缩强度为 75~85MPa。Tris 缓冲液浸泡实验表明，随着孔间距的降低和孔径的增大质量损失增大。Mg-HA（05-5CNT/CF）的蛋白吸附量比 Mg-HA（05-CNT/CF）提高了 63.69 %，具有极强的蛋白质吸附能力。微纳结构的引入同时能够促进定向微纳多孔材料表面细胞的增殖。

（3）多孔 Mg-HA 植入大鼠胫骨缺损部位 4 和 8 周后，无免疫排斥反应。Mg-HA（05-CNT/CF）和 Mg-HA（05-5CNT/CF）在缺损部位均可见到新生的骨组织。VG 和 H&E 染色表明植入物和缺损部位的界面处产生较多新生组织填充在结合区域，界面新生骨和胶原纤维增加，产生大量成熟骨组织。本研究制备的具有定向微纳多孔的 Mg-HA 生物活性材料兼具优异的力学性能和生物活性，能够满足承重部位骨缺损的需要。

关键字 羟基磷灰石，微纳结构，多孔陶瓷，力学性能，生物活性

D18-O-41**高比容量储锂硅基负极：从液态到固态电池**

张桥保*

厦门大学材料学院

发展高能量密度、高功率密度和长循环寿命二次电池是当前国内外前沿研究热点，也是能源电化学材料研究的核心。先进电极材料开发是实现高比能二次电池的关键前提，这迫切需要对现有电极材料进行优化并探索新型高性能电极材料，同时借助清晰、精确的先进实验表征手段对新机理、新材料和新设计进行深入探讨，以形成系统的科学认识。

本报告将围绕高比容量硅基负极材料在液态和固态电池中的结构设计及性能提升的机理解析而展开，以先进显微和谱学表征为研究手段，深入解析其微观结构与宏观电化学性能间的构效关系，以期为解决目前硅基负极应用与液态和固态锂离子电池存在的瓶颈问题提供新的研究思路

D18-O-42**仿生非经典结晶实现手性铜碘团簇圆偏振光放大**

姚宏斌*

中国科学技术大学

多级手性结构发光材料在实现高效圆偏振发光方面具有很大的潜力。近年来，基于无机纳米颗粒以及超分子组装的手性结构发光材料展示了圆偏振发光不对称因子的放大效应，但其设计合成复杂，所制备的材料发光效率偏低[1]。如何设计高效的手性发光基元并实现其跨尺度的多级结构组装是获得高效圆偏振发光材料的关键。我们在前期积累的铜碘团簇基高效发光材料制备的基础上[2-3]，提出手性铜碘发光团簇的设计概念[4]，从手性团簇结构基元出发，采用仿生非经典结晶驱动手性铜碘团簇多级结构组装，获得了高效的圆偏振发光材料[5]。通过监控手性铜碘团簇的结晶过程，我们揭示了其仿生非经典结晶机理，涉及了晶体成核，纳米颗粒团聚，取向搭接以及介观尺度转化四个过程。相比于传统经典结晶制备的手性团簇晶体材料，仿生非经典结晶制备的多级手性结构铜碘团簇晶体材料具有显著的手性放大效应，最终实现了高的发光量子产率（32%）和高的不对称性因子（0.015），同时可将其用作荧光粉制备发光偏振度为 1.86%的圆偏振发光二极管器件。

参考文献：

- [1] Sang, Y. T., Liu, M. H.* et al. Adv. Mater. 32, 1900110 (2020).
- [2] Chen, C., Yao, H. B.* et al. Angew. Chem. Int. Ed. 57, 7106-7110 (2018).
- [3] Wang, J. J., Yao, H. B.* et al. J. Am. Chem. Soc. 142, 3686-3690 (2020).
- [4] Wang, J. J., Yao, H. B.* et al. J. Am. Chem. Soc. 143, 10860-10864 (2021).
- [5] Feng, L. Z., Yao, H. B.* et al. Nature Communications, 2022, in press.

D18-O-43**功能水凝胶的仿生设计与制造**

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。

参考文献：

- [1] X. Liang, G. Chen, S. Lin, J. Zhang, L. Wang, P. Zhang, Y. Lan, J. Liu*. Adv. Mater., 2022, 34(8), 2107106.
- [2] X. Liang, G. Chen, S. Lin, J. Zhang, L. Wang, P. Zhang, Z. Wang, Z. Wang, Y. Lan, J. Liu*. Adv. Mater. 2021, 33, 202102011.
- [3] X. Liang, G. Chen, I. Lei, P. Zhang, Z. Wang, X. Chen, M. Lu, J. Zhang, Z. Wang, T. Sun, Y. Lan, J. Liu*. Adv. Mater., 2022, in press. DOI:10.1002/adma.202207587.
- [4] G. Chen, X. Liang, P. Zhang, S. Lin, C. Cai, Z. Yu, J. Liu*. Adv. Funct. Mater., 2022, 32, 2113262.
- [5] J. Liu,† S. Lin,† X. Liu,† Z. Qin,† Y. Yang, J. Zang, X. Zhao. Nat. Commun. 2020, 11, 1071.
- [6] S. Lin,† J. Liu,† X. Liu, X. Zhao. PNAS 2019, 116, 10244-10249.

D18-O-44

高强高韧微纳复合材料的设计合成及性能研究

赵赫威*

北京航空航天大学化学学院

随着航空航天、国防科技及生物医疗等领域的快速发展，兼具高强与高韧的先进材料是实现主承力构件小型化和高效化的关键。但强度与韧性在传统工程材料中被认为是一对相悖的属性，使材料兼具高强与高韧仍是一个极大的挑战。基于微纳米结构单元的可控合成与组装，我们以综合力学性能优异的生物材料（例如珍珠母、牙釉质等）作为构筑模型，通过宏观尺度多级次组装策略制备得到一系列高强高韧仿生复合材料，并从多个尺度揭示复合材料的增强增韧机制。该物相调控及多级次组装的高强高韧微纳复合材料体系实现了方法学和材料学的创新，为新一代高性能工程材料的研发和应用提供理论和技术指导。

D18-O-45

仿生动态纳米通道材料及其应用

王苗*, 侯旭

厦门大学

受生物离子通道的启发，构筑仿生人工纳米通道材料，研究纳米限域空间的离子输运行为和调控方法，一方面有助于深入理解细胞活动和生命过程，另一方面，也拓展出一系列新型人工纳米通道结构材料，用于物质分离、能量存储与转、生物传感、纳流控器件等领域。目前，针对仿生人工纳米通道及其离子输运机制的研究，主要集中于通过静态固定形状纳米通道内表面物理化学性质调控和响应性分子的修饰来改变通道内物质输运性质。值得关注的是，生物纳米通道还有很多是动态形变的，例如在生理过程和疾病活动中，细胞间会出现不间断弯曲的纳米尺度通道。本文报道了一种基于碳纳米管的动态曲率的纳米通道膜系统，其表现出依赖于电压、浓度和离子大小的离子输运反常效应，以及通过调节曲率实时控制离子整流效应的可逆转换。这种动态的纳米通道膜材料可进一步用于构建智能纳米通道系统，在柔性的纳流控体系、离子整流器、纳米流体发电机、离子分离等领域具有重要的应用前景。

D18-O-46**Self-Healing and Regenerative Hard Materials by Biomimetic Stratification**

Ming Yang*

The State Key Laboratory of Inorganic Synthesis and Preparative Chemistry, Jilin University

One of the fundamental challenge in materials design is the integration of different properties that contradict with each other. For example, hard materials typically cannot self-heal or regenerate. By mimicking the multilayered structure of biological tissues, we overcome the fundamental dilemma in achieving hard materials with dynamic functions. My talk will be focused on the epidermis-like smart coatings, which integrate self-healing ability with enamel-like hardness. Our recent work on a damage tolerant and self-healable tooth replicate reminiscent of the enamel-dentin junction and the self-growth of regenerative calcareous layer inspired by the moulting process of crustacean exoskeletons will be also covered. Biomimetic stratification represents a new paradigm for broadening the property space of artificial materials.

D18-O-47**仿生新型结构色材料的设计和制备**

肖明*

四川大学高分子科学与工程学院

结构色是通过微纳米结构选择性地反射特定波段的光谱形成的。和传统颜料相比，结构色不易褪色，耐溶剂洗涤，而且更容易设计成刺激响应的变色材料。结构色的应用需同时具备优化的光学性能、多功能性以及大规模生产性。大自然中结构色广泛存在，如蝴蝶的翅膀和鸟类羽毛等，为我们解决这些问题提供了无限的灵感。在该报告中，我将讲述如何向大自然学习，从新结构和新功能两个角度，阐述如何设计和制备新型结构色材料：（1）基于鸟类羽毛微纳结构启发和光学模拟计算指导，设计开发了黑色素为核、二氧化硅为壳的核壳纳米粒子，并使用“一锅”乳液法组成微米尺度的光学超球结构，不仅提高了结构色的亮度，实现了无角度依赖性，还提供了可规模化制备结构色材料的一种新方法^[1]；（2）受章鱼的快速变色和伞鸟的无角度依赖结构色的启发，通过融合介电性弹性体和光子玻璃，开发了全固态柔性电致变色体系，并且能够利用力学不稳定性而发生面外变形，实现明显快速的颜色变化^[2]。大自然给结构色材料设计带来的启发作用，希望也能够启发其他新材料的开发和制备。

[1] M. Xiao, Z. Hu, Z. Wang, Y. Li, A. D. Tormo, N. L. Thomas, B. Wang, N. C. Gianneschi, M. D. Shawkey, A. Dhinojwala, Science Advances 2017, 3, e1701151.

[2] M. Xiao, J. Mao, M. Kolloosche, V. Hwang, D. R. Clarke, V. N. Manoharan, Mater. Horiz. 2022, 9, 1954.

D18-O-48**基于仿生测量界面的污染物高灵敏检测**

黄羽*

中国地质大学（武汉）材料与化学学院

环境污染物的现场可视化检测仍然面临着灵敏度不足和不可控的动态范围挑战。在这里，我们报告了一种基于仿生结构界面的正交双重调控策略，以实现精确控制液滴的运动，并应用于高灵敏传感检测。实验证明，该策略实现了环境毒素卡那霉素等多种靶标的可控动态范围检测，并成功辨别具有不同链长的五种 DNA。

蝴蝶翅膀具有各向异性浸润性，我们模拟蝴蝶翅膀的微米级沟槽结构构筑了检测界面，并将经靶标

触发滚环扩增反应的液滴置于其上，以分别调节来自液相和固相的阻力。液相的阻力主要取决于 DNA 和润滑剂之间的疏水相互作用，可以通过不同的 DNA 平均链长进行微调。同时，固相表面的阻力由周期性微米沟槽的能垒决定，可以通过改变液滴在表面上的滑动方向进行调整。通过考察在检测界面的运动行为，可以得到生物靶标的浓度。通过三种不同的方法，疏水相互作用被证明与微沟槽的各向异性阻力正交。这种正交双重调控策略展示了精确控制生物液滴运动行为和高灵敏检测的能力，可用于各种生物靶标的可调动态范围检测，将为超亲水生物传感器、可视化检测提供新的思路。

关键词： 仿生结构检测界面;各向异性浸润性;高灵敏检测;疏水作用力;动态范围

D18-O-49

Bioinspired Design of Solid-Repellent Coatings

Jing Wang*

Shanghai Jiao Tong University

Sticky problems on surfaces from various foulants inhibit us from the access to clean toilets, hygiene medical ware, and high-efficient energy transfer. They vastly exist in most industrial, medical, and household interfaces, and they dramatically dysfunction the well-designed surface structures by sticking on them. In contrast, nature has provided us abundant examples of keeping surfaces clean, from duck feather to lotus leaf, to springtail skin, to pitcher plant rim, and to many other insect/animal surfaces. These examples share some common materials design principles for antifouling, particularly for solid repellency. With complex fouling conditions [1] on surfaces for various applications, it is critical to explore the mechanisms of solid-repellent natural surfaces and create effective antifouling coatings.

Inspired by the pilot whale skin [2], herein, we report the design of solid- and liquid-repellent coatings [3, 4] that can effectively repel a wide range of solid foulants. For example, the ice adhesion strength on such coatings was less than 1 kPa, at least 2 orders of magnitude lower than the state-of-the-art anti-icing materials. Further, we reveal a new strategy to significantly enhance the mechanical durability of such coatings by incorporating partially crosslinked lubricating chains within a durable polymer matrix. In particular, we fabricated partially crosslinked omniphobic polyurethane (omni-PU) coatings [4] that can repel a broad range of foulants, comprised of both liquid and solid phases. The fabricated coatings are an order of magnitude more resistant to cyclic abrasion than current state-of-the-art slippery surfaces. Furthermore, through the integration of classic wetting and tribology models, we introduce a new material design parameter (KAR) for abrasion-resistant polymeric coatings. This combination of mechanical durability and broad antifouling properties enables the implication of such coatings to a wide variety of industrial and medical settings, including wind turbine blades, heat exchanges, and antifouling robotics.

References

- [1] A. Dhyani, J. Wang, A. K. Halvey, B. Macdonald, G. Mehta, and A. Tuteja, "Design and applications of surfaces that control the accretion of matter," *Science*, vol. 373, p. eaba5010, 2021.
- [2] C. Baum, F. Simon, W. Meyer, L.-G. Fleischer, D. Siebers, J. Kacza, et al., "Surface Properties of the Skin of the Pilot Whale *Globicephala melas*," *Biofouling*, vol. 19, pp. 181-186, 2003/01/01 2003.
- [3] J. Wang, L. Wang, N. Sun, R. Tierney, H. Li, M. Corsetti, et al., "Viscoelastic solid-repellent coatings for extreme water saving and global sanitation," *Nature Sustainability*, vol. 2, pp. 1097-1105, 2019/12/01 2019.
- [4] J. Wang, B. Wu, A. Dhyani, T. Repetto, A. J. Gayle, T. H. Cho, et al., "Durable Liquid- and Solid-Repellent Elastomeric Coatings Infused with Partially Crosslinked Lubricants," *ACS Applied Materials &*

Interfaces, vol. 14, pp. 22466-22475, 2022/05/18 2022.

Key words anti-fouling, bioinspired design, mechanical properties, blue energy

D18-O-50

仿生多功能磁性界面材料和微观机器人集群

王文冬*

上海交通大学

本报告将首先介绍仿猪笼草结构的磁流体注入多孔表面(FLIPS)。通过调整磁力和毛细管力对磁流体作用力的相对大小, FLIPS 在多个尺度上呈现可逆的动态表面形貌响应, 具有包括运输和组装胶体颗粒, 控制液滴流, 运输和混合液滴, 泵送液体, 切换黏附力和摩擦力, 以及清除生物膜等多种功能。其次, 将介绍受自然界生物集群自组织启发, 关于微观机器人集群的研究。将动态自组装和可编程自组装的两个概念融合, 通过编辑微观机器人个体的几何形状以调整个体间毛细管力、磁力和水动力三种作用力的相互平衡, 实现微观机器人集体导航、集体运输、软颗粒分类和组装, 以及集群班图动态可逆重构等涌现功能。此外, 以此集群作为非平衡态下统计物理的实验模型, 提出以基于邻居距离分布的信息熵作为度量, 区分不同非平衡态相, 并从实验、解析理论和蒙特卡洛模拟三个方面揭示了邻居距离熵作为相变度量的有效性。

D18-O-51

构筑原子尺度电压门控仿生离子通道

薛亚辉*

南方科技大学力学与航空航天工程系

生物离子通道借助原子尺度的滤芯结构和电压敏感闸门, 实现离子的超快、可控且精确选择性传输, 从而维持生命活动的基本功能。然而利用人工结构来仿生这一生物系统仍然是当今一大难题, 解决这一难题将为更好地理解其基本原理和实际应用提供重要的指导意义。我们结合纳米材料、电化学、微纳米加工技术等手段研究了离子在原子尺度受限空间内的电控传输动力学。制备出了由电压控制的 3 埃米尺度的石墨烯通道, 实现了在电压开关控制下的、超快且选择性的离子传输, 其中离子的等效扩散系数比其在水体中高两个数量级^[1]。这是目前观测到的最快离子扩散传输, 甚至高于目前测得的生物膜通道内的离子等效扩散系数。由于水化离子进入原子尺度石墨烯通道内具有较高的能量势垒, 而电势的施加可以帮助这些离子克服能量势垒的限制, 因此原子尺度的离子传输还表现出良好的电压开-关可控性。为了揭示离子在原子尺度石墨烯通道内快速传输的机理, 我们利用光学反射实验原位测量了石墨烯通道内在电压控制下的电荷密度, 发现了通道内超高的电荷密度分布。建立了预测离子在原子尺度石墨烯通道内等效扩散系数的平均场理论, 理论预测很好地吻合了实验结果, 揭示出离子在极度受限空间内的密集排布引发其协同移动作用的力学机制, 该机制极类似于经典力学中的牛顿摆。该发现不仅有助于人们更好地理解生物通道内离子快速选择性传输的机理, 而且有助于设计可用于离子电池、海水淡化、医疗渗析等技术中的可控且超快离子传输器件。

参考文献:

[1] Y. Xue, Y. Xia, S. Yang, Y. Alsaied, K. Y. Fong, Y. Wang, X. Zhang, Atomic-scale ion transistor with ultrahigh diffusivity. Science 372, 501-503 (2021).

D18-O-52

一种肠胃蠕动启发的水凝胶黏性液体驱动器

陈林峰*, 张立云, 夏帆

中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 生物地质与环境地质国家重点实验室

可控液体传输在集水、打印、微流体、油水分离等领域具有重要应用, 一直以来受到研究者们的关注。自然界生物为人造可控液体传输材料设计提供了思路, 主要策略包括浸润性梯度和结构梯度。但是这些方法主要适用于低黏性的液体 ($<100 \text{ mPa} \cdot \text{S}$), 例如水(溶液)和常见有机溶剂等; 黏性液体广泛存在于日常生活和工业生产中, 例如重油, 聚合物溶液, 离子液体等, 但是其可控传输少有研究, 而且传统液体传输策略也难以实现对黏性液体的有效驱动。哺乳动物的肠胃蠕动, 通过外层肌肉收缩提供驱动力和内层黏液润滑减阻相结合, 能够有效地定向传输黏液食物流体 (黏度 $\sim 2000 \text{ mPa} \cdot \text{S}$)。受此启发, 我们发展了一种双层管状水凝胶驱动器, 可以实现对黏性液体的有效定向传输。驱动器外层为掺杂碳纳米管的聚异丙基丙烯酰胺(PNIPAM)基水凝胶, 内层为超亲水的海藻酸钠(SA)。在可控红外激光照射下, 外层水凝胶发生收缩, 产生定向驱动力; 同时水凝胶收缩产生的水在SA表面形成润滑层, 两者协同作用下, 黏性液体能够发生定向传输, 而且无残留。液体黏性范围从 $\sim 1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ - $>80000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 这是目前报道的黏度最高的液体传输。另外, 我们展示了黏性液体驱动器的潜在应用, 例如对不同黏性液体的定向传输, 黏性增大的聚合反应液体定向传输, 以及黏性液体打印喷头。本研究不仅在基础研究方面拓展可控液体传输的研究范围, 为新的液体驱动器设计提供思路, 而且在基于黏性液体的微流体、打印等领域具有潜在的应用价值。

关键词: 液体传输, 水凝胶, 黏性液体, 蠕动, 红外

D18-O-53

蚕丝基仿生复合材料

许宗溥¹, 柏浩²

1. 浙江大学应用生物资源研究所

2. 浙江大学化学工程与生物工程学院

通过共混多种组分(如金属、陶瓷、聚合物等)是制备高性能复合材料的通用策略, 但由此得到的复合材料往往存在分离回收困难和不易降解等问题, 容易造成严重的环境污染。相比之下, 许多天然生物材料在组分选择有限(蛋白质、多糖、矿物)的情况下, 通过构筑复杂的多尺度结构实现了优异性能。这种“单组分复合材料”构筑策略在天然材料中非常普遍。例如, 蜘蛛丝主要由蛋白质构成, 却兼具高强度和高韧性, 这源于其纳米晶区嵌入无定形区的复合结构; 与之类似, 竹子优异的力学性能也是通过多级有序的纤维素纳米纤维增强同属多糖的基质实现的。虽然它们属于纯聚合物材料, 但通过构筑多级复合结构实现了优异性能。受此启发, 我们提出了一种“单组分复合材料”仿生设计策略, 利用蚕丝蛋白作为唯一原料, 以天然贝壳“砖-泥”结构为仿生对象, 通过双向冷冻、湿度处理及致密化过程制备出高性能“蚕丝贝壳”。与不具备仿贝壳结构的蚕丝蛋白均质材料(蚕丝板)相比, “蚕丝贝壳”的强度和韧性同时得到了提升, 其强度、模量、应变分别达到了 125 MPa , 6.8 GPa , 3% , 是蚕丝板的 1.67, 1.37, 1.19 倍。这种仿生复合结构的优势也使得“蚕丝贝壳”的力学性能显著优于众多常用的高分子材料, 充分表明其有潜力部分替代现有的塑料制品。同时, “蚕丝贝壳”展现出简单且可控的塑形能力, 仅通过水蒸汽处理便可将其加工成一系列三维形状, 突破了传统工艺中需将流动态聚合物置于特定模具中塑形的限制, 提供了一种准固态条件下的无模具塑形方法。另外, 由于蚕丝蛋白的生物来源属性, 这种“蚕丝贝壳”能够在蛋白酶的作用下发生完全的生物降解, 显示出优异的环境相容性和可持续性, 也表明在达到使用寿命后可对其进行按需处理或回收利用。本研究不仅为深入理解天然生物材料的复杂多尺度结构及其组分-结构-性能的关系提供了一个新视角, 而且也为设计和开发具有简单组分的可降解、易塑形高性

能复合材料提供了一种新的仿生策略。

D18-O-54

基于扫描探针的微纳米尺度结构及物性表征

陈苇纲

布鲁克（北京）科技有限公司

介绍扫描探针显微成像技术的新进展，如在高分辨形貌测试的基础上进一步实现纳米力学（杨氏模量、粘附力、流变学特性等），以及纳米电学、纳米磁学和纳米化学成像等新技术，以及带来的新应用。

D18-I-17

面向生物医学应用的仿生多孔材料

袁荃*

湖南大学

水是生命之源，在生命体内，水与生物大分子共同完成了人体的物质代谢、能量代谢和信息代谢。人体的水分子代谢异常会引起水分子与电解质离子的比例失衡，导致机体的渗透压失衡和新陈代谢紊乱，继而引发脑出血、肌无力、全身性休克等疾病。在生命体内，横跨细胞膜的水通道蛋白能够在尺寸筛分作用和非共价相互作用等作用力下对水分子进行高选择性和快速的分离和运输，从而维持人体的体液平衡。在水通道蛋白的启发下，我们利用原子薄层分离膜发展了基于尺寸筛分作用的高效膜分离法，成功获得了平均孔径为 0.6 nm 的纳米多孔分离膜。原子层厚的分离膜因其单原子层厚度的优势，极大地缩短了水分子与分离膜之间的相互作用时间，提高了分离效率。研究发现，在尺寸筛分作用下，原子层厚的纳米多孔分离膜能够对尺寸相差仅为 0.4 nm 的盐离子和水分子进行高效选择性分离，分离效率是传统厚质分离膜的 10 倍。进一步调控纳米孔的尺寸和孔密度，实现了不同尺寸不同电荷盐离子、罗丹明 B、异硫氰酸荧光素、亚甲基蓝等与水分子之间的高效选择性分离。

D18-I-18

仿生微结构的力学行为与设计研究

吴开金¹，宋兆强²，张潇¹，王佳璐¹，何陵辉¹，倪勇^{1*}

¹中科院材料力学行为和设计重点实验室，中国科学技术大学近代力学系

²Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California

生物结构材料优异力学行为的背后往往源于其亿万年演化而成的独特的微纳结构。揭示生物结构材料优异力学性能背后的微结构作用机制，从而启发人们开发优异力学性能的仿生结构成为近期研究的热点。通过力学模拟结合实验验证，我们研究了仿“砖块-灰泥”结构的力学行为，揭示了仿“砖块-灰泥”结构界面强度、预应力和加载速度影响的损伤破坏模式和力学性能变化。通过断裂力学模型分析，我们揭示了螳螂虾鄂足部位的软硬复合相交错排布的 Bouligand 扭曲型结构存在优化扭转角增强断裂韧性的内在机制，相关结果得到了实验结果的验证。这些结果显示了生物结构材料优异力学性能被复制和放大的可能性与局限性。

D18-O-55

基于双信号探针的活体成像与测量

宋继彬*

北京化工大学

在活体层面对疾病特征分子的实时动态变化信息进行成像及测量，这对于研究疾病发生分子机制具有重要意义。然而，目前利用活体成像对疾病相关活体内分子信息进行量化的获取仍然面临着挑战，也是当前化学测量学领域最具挑战性的问题之一。目前 NIR-II 区荧光与光声成像主要集中在直接对疾病病变或者器官生物成像。目前利用活体成像对疾病相关活体内分子信息进行量化的获取仍然面临着挑战，也是当前化学测量学领域最具挑战性的问题之一。

为进一步提高活体成像精准度及实现可定量分析，我们课题组发展了一系列具有响应性的 NIR-II 区荧光与光声双模式成像比率型分子探针，用于靶向成像具有免疫检查点通路的肿瘤细胞以及免疫相关细胞的特征生物标记物。同时建立了基于 NIR-II 区比率型成像的活体测量新的方法，提高了对生理分子信息原位、定量获取的精准度。揭示了活体分子比率成像信号与疾病发生发展之间的关联机制，提出了实时、无创疾病活体分子诊断新策略。

参考文献

- [1] Fu, Q.; Feng, H.; Su, L.; Zhang, X.; Liu, L.; Yang, H.; Song, J.B, Angew. Chem. Int. Ed. 2022, 61, e202112237.
- [2] Li, Q.; Ge, X.; Ye, J.; Li, Z.; Su, L.; Wu, Y.; Yang, H.; Song, J. B, Angew. Chem. Int. Ed. 2021. 60: 202015451.
- [3] Zhao, C.; Chen, J.; Zhong, R.; Chen, D. S.; Shi, J.; Song, J. B, Angew. Chem. Int. Ed. 2021, 60: 201915833.
- [4] Zhang, X.; Li Z.; Wu Y.; Ge. X.; Su. L.; Yang. H.; Song, J. B, Angew. Chem. Int. Ed. 2021, 60: 202105207.
- [5] Liao, N.; Su, L.; Zheng, Y.; Yang, H.; Liu, X.; Song J. B, Angew. Chem. Int. Ed. 2021, 60: 202106730.

D18-O-56

微生物-纳米杂化材料的催化能量转化

苏育德*

中国科学技术大学苏州高等研究院

由纳米材料和微生物材料组成的新型杂化材料，兼具纳米材料（超高的比表面积，独特可变的物理、化学性质，良好的生物兼容性）和微生物材料（高催化选择性，可以自我繁殖并自我修复）的特性，在能源与催化领域具有巨大潜力。理解并优化微生物与纳米材料之间的界面和电子转移过程，是这类杂化体系亟需解决的问题。通过电化学手段和原位负载的方法，我们系统地优化了纳米功能材料和微生物催化剂之间的界面，实现了：1）密堆积的固碳细菌-纳米线杂化电极，一周时间内人工光合作用效率达 3.6%；2）产电细菌-共轭聚合物智能杂化体系，将微生物燃料电池的效率提高 150 倍，同时可以在燃料电池与超级电容器之间进行可逆功能转化。同时，我们提出了可穿戴微生物燃料电池的概念，有望实现人体皮肤表面的可持续自供电。

D18-O-57

仿生光催化 NADH 再生及三相界面光酶催化 CO₂ 还原

刘健*

青岛科技大学

氧化还原酶是一类典型的生物催化剂，其在化学品合成、新药开发等领域发挥着至关重要的作用。然而，大部分氧化还原酶都需要消耗计量比的辅酶（NADH/NAD⁺）才能呈现持续高效的催化活性。如何实现 NADH 的高效再生，进而实现光耦合的酶催化用于高附加值化学品的合成（如 CO₂ 还原）是该领域的研究热点。

我们在过去几年致力于光能驱动的辅酶再生，首先提出并设计了基于氮化碳材料的仿生光催化辅酶再生体系并逐步拓展到其他共轭聚合物体系。其主要包括：（1）基于共轭体系和辅酶（生物氢 NAD(P)H）

中烟酰胺、腺嘌呤的 π - π 相互作用，首次将石墨相氮化碳用于光催化辅酶 NADH 再生，并进一步拓展了光敏体系，构筑了包括氮掺杂石墨炔、基于三嗪骨架的噻唑并噻唑以及二苯并噻吩砜共轭微孔聚合物的光催化辅酶再生体系；（2）设计制备仿生单原子负载二维氮化碳催化剂，利用 Co1/C3N4 中不饱和配位的 Co 单原子锚定 Rh 络合物 $[\text{Cp}^*\text{Rh}(\text{bpy})(\text{H}_2\text{O})]^{2+}$ ，基于上述 π - π 相互作用和 Rh 络合物的特异性电子转移，实现了高选择性和产率的 1, 4-NADH 光催化再生。

近来，我们从模拟金属酶的二级配位结构出发，利用 MIL-125-NH₂ 上的氨基功能化实现 Rh 络合物的固定。固定铑络合物后的 MIL-125-NH₂ 由于超快的光生载流子传输，可以实现在一小时内 70.9% 的 NADH 高转化率。此外，将甲酸脱氢酶固定在两侧具有不同浸润性的纤维素膜上。固定在疏水侧上的甲酸脱氢酶可以利用生成的 NADH 将局域富集的 CO₂ 高效转化为甲酸，其转化率可达到 24 小时内 24 mM unit⁻¹。疏水侧负载的甲酸脱氢酶活性要高于游离的酶和亲水侧负载的酶，且具有较好的稳定性。上述工作展现了利用 MOF 的有机配体来构筑催化仿酶活性中心的潜力，并将辅酶的高效原位再生和酶的固定耦合起来，实现了光酶协同 CO₂ 到甲酸的转化。

D18-O-58

单结构层纳米孔测量

冯建东*

浙江大学化学系

纳米孔的基本测量原理是利用孔道限域电场与分子的相互作用，测量单分子穿过纳米孔引起的瞬时离子电流变化，进而关联分子结构信息。纳米孔的分辨能力可分为空间分辨和时间分辨。空间分辨同纳米孔结构直接相关；时间分辨则取决于测量带宽。单结构层纳米孔是指结构为单层晶体结构或单分子层的纳米孔道。由于其可以将分子限域至亚纳米尺度，单结构层纳米孔可提供高的测量灵敏度。我们建立了自上而下构建的单层二硫化钼纳米孔加工方法，提出了自下而上合成的单层大环分子纳米孔新策略，制备了从单原子缺陷到可化学定义的单大环分子孔。我们发展了电学-光学-电化学转化和单分子精密测量方法。针对纳米孔电测量缺乏空间分辨率，我们发展了纳米孔光学读出技术，实现了质子传输的时空分辨成像。在传输机制方面，我们开展了单结构层纳米孔离子传输、流体传输和分子传输研究，实验发现了离子库伦阻塞现象、离子电导振荡现象、非线性电流体动力学耦合传输现象，结合分析模型、多物理场模型和分子动力学模型诠释了不同尺度下的物理图像，突破了经典传输认知。利用单结构层纳米孔发展了离子传输操控和单分子测量应用。单结构层纳米孔研究推动了人工纳米孔在极端制造精度、非经典认知和测量精度方面的发展。

D18-O-59

发展自组织矿化策略构建仿生矿物结构

姜源*

厦门大学

生命体在进化压力下演变形成生物矿物多级结构，实现结构功能。其中，棱柱状及多层状生物矿物结构简单，力学性能优异，因而成为了最典型的仿生模型。迄今，尽管材料加工手段已在仿生结构的可控构建方面取得了一系列突破性进展，但是材料加工过程往往伴随着耗时、低转化率及高能耗。如何学习生物矿化机制，发展自组织矿化策略合成仿生结构，仍是材料科学的重要目标之一。我们首先发展了基于纳米籽晶外延矿化的仿生策略，可控构筑了类棱柱状碳酸钙矿物，并通过多种高分子的界面协同调控机制，优化了仿生矿物的构效关系。我们也利用半透膜微腔建立了反应-扩散系统，揭示了多层状自组织结构演变的物理化学机制，进而发展了多尺度结构调控方法，最终制备了强韧型砖泥结构。我们的研究表明，自组织矿化系统可以在物理化学机制的指导下合成典型仿生矿物，并调节多个尺度的结构信息。

D18-O-60

多功能仿生纳米材料设计用于活性氧相关疾病研究

穆婧*

北京大学深圳医院

活性氧在生理功能调节中发挥着至关重要的作用。活性氧调节失衡造成的氧化应激与包括癌症、炎症等多种疾病息息相关。通过在不同生理条件下调节活性氧的生成、转化或是耗竭过程，可实现对病变细胞或组织到健康组织的转变。基于此，我们开发了一系列与活性氧调节相关的纳米材料，发挥其在生理病理条件下的生物学效应。我们分别研究了仿生纳米酶的活性氧产生机理、光敏剂活性氧产生对肿瘤的杀伤作用以及化学动力学相关活性氧产生的治疗效果。另一方面，我们设计了活性氧响应的纳米诊疗剂用于活体荧光成像及药物的定点释放。此外，我们开发了新型高效的仿生纳米酶反应器，利用活性氧清除和一氧化氮调节作用，降低氧化应激损伤、抑制细胞凋亡及炎症因子的表达，最终实现对缺血再灌注损伤的有效干预。基于活性氧研究的多功能纳米材料的设计为发展安全有效的治疗方案及进一步的生物医学应用提供了新思路和研究基础。

D18-O-61

模量调控凋亡细胞仿生体经由巨噬细胞的抗炎促组织修复作用

曾戎*¹，张光林^{1,2}

1. 暨南大学

2. 韶关学院

受机体无炎症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，我们基于“源于自然，超越自然”的理念，采用薄膜分散-挤出法构建了两种不同模量的含凋亡细胞“食我”信号——磷脂酰丝氨酸（PS）的凋亡细胞仿生脂质体（PSLipos，粒径均约 120 nm，脂质中 PS 含量相同），采用原子力学显微镜基于赫兹模型测得其杨氏模量分别为~80 kPa 和~0.5 kPa，然后通过细胞和动物实验探究了模量对仿生体与巨噬细胞相互作用及诱导效应的调控。

首先，我们采用流式细胞术与共聚焦显微镜研究了 RAW264.7 巨噬细胞对 PSLipos 的摄取行为，结果表明，模量较低的柔性 PSLipos 更能抵抗巨噬细胞的摄取，但可通过柔性和 PS 受体的协同作用与巨噬细胞表面持久结合，从而延长柔性仿生体的有效作用时间。进一步的抗炎促组织修复评价结果表明：在未负载药物的情况下，柔性 PSLipos 更有效地经 PS 受体介导抑制 LPS+IFN γ 诱导的巨噬细胞向 M1 型极化和促炎因子表达，及促进 IL-4+IL-13 诱导的巨噬细胞向 M2 型极化和分泌抗炎因子，甚至可以显著提高糖尿病大鼠创伤模型创面中巨噬细胞 M2/M1 值，促进创面修复。

其次，我们采用 pH 梯度法在两种凋亡细胞仿生体中载入抗炎药物乙酰半胱氨酸（NAC），发现 NAC 的装载对仿生体的大小、形态和模量几乎没有影响，且两种载药仿生系统具有相似的载药和体外缓释行为。进一步采用体外细胞共培养模型和急性肺损伤（ALI）小鼠模型进行功效评价，结果表明：模量较低的 PSLipos-NAC 更有效地抑制巨噬细胞的炎症反应及促进肺上皮细胞伤口愈合，通过雾化吸入显著降低了 ALI 小鼠肺组织中 M1 样巨噬细胞的炎症反应，并改善肺组织的病理形态。

上述结果表明，柔性凋亡细胞仿生体对巨噬细胞的协同调控作用有望为慢性难愈性创面、ALI 等炎症相关疾病提供一种有效的仿生治疗手段，同时也为“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-O-62

可多重响应修复的高韧性水凝胶

秦海利*

合肥工业大学

近年来,随着柔性电子器件的快速发展,水凝胶材料基于其独特的三维网络结构和机械柔性可作为可穿戴电子器件和柔性仿生器件的关键性材料,受到人们极大关注。然而,在实际应用过程中,该类材料在高频率大变形操作下容易发生机械损伤,造成器件结构破坏和电化学性能衰退。自修复性能,广泛存在于生物组织中,可通过细胞或组织进行自我修复并恢复其结构和功能。将自修复功能引入材料及器件体系,可保证电容器在发生机械损伤时自动修复其结构和电化学性能,有利于延长整体电学器件的使用寿命和安全性。考虑到可穿戴电子器件本身的多重响应性,为避免修复过程中刺激信号对电容器邻近电子器件的影响,开发多重响应修复型超级电容器有利于扩展电容器的实际应用范围。针对上述关键性科学问题,我们提出协同纳米复合交联和金属配位(如 Au-S)作用,通过原位自由基聚合,构筑兼具高韧性、高效自修复型水凝胶。协同纳米材料的多功能性(如磁热、光热、焦耳热等)和金属配位的热不稳定性,实现高性能水凝胶在多重刺激(光、pH、电、磁等)诱导下的自修复行为。以上述凝胶材料为基础,协同修复诱导的材料集成策略,利用各层间丰富的金属配位作用,一体化构筑可多重响应修复的柔性器件,如柔性可拉伸超级电容器。

参考文献

- [1] Qin, H. (#); Liu, P. (#); Chen, C.; Cong, H.-P.*; Yu, S.-H.* Nat. Commun., 2021, 12, 4297.
- [2] Qin, H. (#); Zhang, T. (#); Li, N.; Cong, H.-P.*; Yu, S.-H.* Nat. Commun., 2019, 10, 2202.
- [3] Chen, C.-R. (#); Qin, H. (#); Cong, H.-P.*; Yu, S.-H.* Adv. Mater., 2019, 1900573.
- [4] Song, P. (#); Qin, H. (#); Gao, H.-L., Cong, H.-P.*; Yu, S.-H.* Nat. Commun., 2018, 9, 2786.
- [5] Qin, H. (#); Zhang, T. (#); Li, H.-N.; Cong, H.-P.*; Yu, S.-H.* Chem, 2017, 3, 691-705.

D18-O-63

仿生湿滑材料与应用

麻拴红*

中国科学院兰州化学物理研究所

湿滑是大自然中存在的一种典型表界面特性,如动物的关节软骨界面、鱼类的表皮等,学习和仿生制造具有相似功能的湿滑材料,对于研发高端植入功能器械具有重要意义。首先,我们基于界面氧化-还原引发机制,建立和发展了铁催化表面引发自由基聚合方法学(SCIRP & UV-SCIRP)体系,解决了在通用基材和器械表面可控生长仿生湿滑水凝胶涂层的难点;并将其成功拓展至非透明器械内腔道,突破了室温或低温条件下-在普适化材料和器械内外表面可控制备水凝胶涂层的关键技术瓶颈;SCIRP & UV-SCIRP 方法学可成功用于多种仿生类器官水凝胶软材料的按需制造,如中空血管、层状驱动器与结构化组织体。此外,我们发展了系列兼顾高承载、低摩擦和抗磨损特性的仿生层状、梯度化软骨水润滑材料,突破了 8MPa 接触应力下 50000 个测试循环内表面近零磨损的关键性能指标;进一步,基于构建的仿生智能润滑调控界面,深层次揭示了界面水化、接触和润滑行为之间的科学关系;通过应用 SCIRP 方法学,成功实现了上述仿生高性能水润滑材料在生物基材和器械表面的涂层化修饰验证。研究成果成功指导了介入型导管用仿生水润滑涂层材料技术的研发,已在多家企业实现转化应用,产生了显著经济效益。

D18-O-64

受猪笼草启发的导电聚合物纳米尖端阵列应用于超快和可控油水分离

王珍高*

武汉大学

近年来,面向生物医学领域的重大需求,研究人员提出生命功能活化的生物活性纳米材料的概念。这类“活”纳米材料将生命功能基元的复杂生物功能整合到材料,建立高级生物功能协同。课题组利用天然来源的生物活性物质与生命功能基元包括多肽、蛋白、细胞、细菌、微生物及其组分活化的纳米材料,在多种疾病的精准治疗方面显示出巨大潜力。我们系统研究了多肽、蛋白等生物活性材料在疾病治疗中的应用;在细胞基生物活性材料中,以细胞为来源,我们提取生物活性细胞膜进行改性,并进一步构建了人工(融合)细胞、中性粒细胞等具有独特治疗功能的材料;在细菌基生物活性材料中,我们提出多种工程化改造细菌的策略,并进一步构建微纳米材料整合的人造微菌群载体实现复杂的治疗功能。此外,我们还建立了包括噬菌体、病毒、微藻在内的其他来源生物活性材料的功能强化纳米系统,成功应用于肿瘤等疾病的诊疗,显著提高疾病治疗的有效性、稳定性与安全性。

D18-O-65

生物合成可持续仿生材料

管庆方*、俞书宏
中国科学技术大学

仿生材料的发展为材料科学带来了许多新的进展,蕴含着巨大的应用潜力。然而,目前仿生材料的制备往往面临过程复杂、尺寸受限、成本高等问题。因此,基于可持续低成本的方式实现仿生材料的大规模制备是仿生材料的一个重要发展方向。我们发展了一种气溶胶辅助的时空耦合生物合成方法,将微生物合成纳米纤维素的过程与纳米材料气溶胶沉积组装过程相结合,利用微生物合成纳米纤维的有序性和纳米材料沉积的可控性,制备出具有优异力学及功能可调控的一系列可持续仿生材料。该方法的突出优势为由微生物合成的纳米纤维网络在为功能纳米材料提供强大的力学支撑的同时,还能最大限度地保留功能纳米材料本身的高比表面等特性,使其在复合材料中也能充分发挥其功能性。另外,该方法在常温常压下进行,无需有机溶剂,其对环境的影响显著低于现有的仿生材料制备手段。由该方法制备的功能仿生材料有望在塑料替代、低碳减排等领域发挥潜力。

D18-O-66

二维界面/三维孔道液体传输调控及应用

衡利苹*
北京航空航天大学

二维、三维界面液体传输行为调控在液滴操纵、印刷、传感、油水分离、智能催化、微芯片等领域具有重要意义,实现界面上液体粘附精准调控对于促进这类材料的发展和应用具有至关重要的作用。实现液体传输调控的关键是要调控界面和液体之间的作用力,进而实现液体运动控制。目前依然存在制约界面粘附精准调控的关键问题:固液界面稳定性差粘附力大,难实现界面粘附的原位可逆调控,三维传输速度低。针对上述问题,作者取得的主要成果如下:(1)发展了液体注入型、凝胶型、分子刷型和固体润滑剂型复合界面,减少了界面粘附力,增加了界面稳定性;(2)在界面中引入快速响应智能基元,设计智能响应高分子复合界面,实现了界面与液体粘附原位可逆调控及液体可控传输。(3)作者进一步将上述界面粘附调控成果引入多孔网络结构体系,实现了太阳光驱动下孔道内液体的快速传输,并用于污水治理,实现了海水,含油污水,含水溶性有机污染物污水等污水的净化。

参考文献

- [1] Han, X.; Heng, L. P. *; Jiang, L. J. Am. Chem. Soc. 2023, 145: 6420
- [2] Han, K. Y.; Heng, L. P. *; Jiang, L. Adv. Funct. Mater., 2022, 32: 2207738.
- [3] Wang, Z. B.; Heng, L. P.*; Jiang, L. Matter, 2021, 4: 1275.

- [4] Wang, X.; Heng, L. P.*; Jiang, L. Adv. Funct. Mater., 2020, 30: 1902686.
[5] Guo, P.; Heng, L. P.*; Jiang, L. Adv. Funct. Mater., 2019, 29: 1808717.

关键字：界面粘附；水的传输；水的净化

D18-O-67

原位力学的光学表征

李怡然*

安徽越视精密仪器有限公司

随着复合材料、超导材料、仿生材料等新材料的研究越发深入，对微小材料、微小部件、微观领域的材料特性进行强度评价的需求越来越高。传统的力学试验机，可以用于材料进行拉伸、压缩、三点弯曲等力学性能测试。对于材料的力学测试结束后，可以在显微镜下观察应力作用处的微观形貌特征变化情况，以此作为力学特性的参考特征。然而此种传统的试验方案，对于正在进行测试中的样品无法有效观测，只能观测到样品的起始微观形貌和试验后的微观形貌。

因此，我们开发了一款能够实现原位拉伸、压缩、三点弯曲的实时动态观测的显微镜系统。主要性能在于：该装置需要适用于样品的原位显微拉伸、压缩和三点弯曲测试，可兼容 3 种以上形状尺寸的样品，通过更换对应夹头实现多种样品和模式的切换；能够实现 3000X 的光学放大，并且光学工作距离能够对焦到拉伸夹具里的样品上；具有透射反射、偏光、明暗场等观察方式，以适应陶瓷、金属、薄膜、晶体等各种样品的观察；能够实现后期新的样品需求时，重新提供相应的夹具定制服务；力学控制软件和光学软件需要兼容并行。

D18-I-19

功能协同的仿生迷你发电机

石峰*

北京化工大学

功能协同的智能系统，是指通过将两种或者两种以上的智能材料或者智能表面集成到一个体系中，使其依次发生作用、相互协同，完成一个复杂的任务，契合生命体系中通过多种作用的高效协同完成复杂任务的模式。在早期研究中，我们将刺激-响应浸润性转变的智能表面与自驱动体系结合，构建了多种功能协同的智能器件，实现了水平或垂直方向的可控运动。近年来，我们进一步集成环境能量捕获和转换体系，模拟自然界的运动现象提出了仿生迷你发电机。例如，受硬骨鱼通过鱼鳔肌调节鱼鳔的收缩与膨胀改变身体密度启发，我们设计了气压响应性的功能协同智能器件，利用微小的环境压力变化实现了器件的垂直往复运动，进而应用电磁感应定律转化为电能。进而，我们通过导出动脉血压，利用收缩压/舒张压的血压差实现了器件的运动和电能转化，有望通过体内自发电解决植入性设备（如心脏起搏器）的电池更换难题。为了进一步解决迷你发电机消耗高品位能量和适用场景少的问题，我们分别开发了太阳光驱动的迷你发电机，以及提出了迷你发电机与现有的发酵生产线相结合，在不消耗有用能源的情况下大幅提高能量转换效率，同时将产生的电能应用于发酵工艺仪表供电。综上，功能协同的仿生迷你发电机为理解生物体功能协同机制提供了思路，也为微弱能量的高效利用提供了方法。

D18-I-20

仿生电化学传感界面细胞与组织监测

黄卫华*

武汉大学

电化学传感器因检测灵敏度高、时间分辨率高、界面易于调控等优势，在生命分析领域受到广泛关注。将功能性仿生小分子修饰于电化学传感界面，能够赋予传感器优良仿生催化及生物相容性等多样功能，将有助于对细胞和组织水平生命活动的实时动态监测。源于多种生物酶活性中心的仿生分子催化剂具有优异的仿生催化性能，我们基于分子间相互作用，在一维纳米线电化学传感器表面可控、充分、稳定修饰多种仿生分子催化剂，极大提升了传感器的检测灵敏度和选择性，首次实现了胞内还原型谷胱甘肽的实时电化学监测^[1]。为实现活细胞的原位培养与监测，电化学传感器除需足够的灵敏度和选择性外，还应具备良好的生物相容性。为此，我们分别在二维平面电极阵列、三维石墨烯电极以及三维可拉伸金纳米管电极等多种传感界面组装与细胞膜特异性作用的功能性小分子 3-氨基苯硼酸和 RGD 短肽等，以提高传感界面的仿生特性，使细胞能够在传感器表面直接附着和生长，进而实现单细胞、群体细胞以及模拟形变组织释放生化信号分子的原位实时监测^[2-4]。

参考文献:

- [1] Wu, W. T.; Chen, X.; Jiao, Y. T.; Fan, W. T.; Liu, Y. L.; Huang, W. H. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202115820.
- [2] Liu, Y. L.; Wang, X. Y.; Xu, J. Q.; Xiao, C.; Liu, Y. H.; Zhang, X. W.; Liu, J. T.; Huang, W. H. *Chem. Sci.* 2015, 6, 1853-1858.
- [3] Hu, X. B.; Liu, Y. L.; Wang, W. J.; Zhang, H. W.; Qin, Y.; Guo, S.; Zhang, X. W.; Fu, L.; Huang, W. H. *Anal. Chem.* 2018, 90, 1136-1141.
- [4] Qin, Y.; Hu, X. B.; Fan, W. T.; Yan, J.; Cheng, S. B.; Liu, Y. L.; Huang, W. H. *Adv. Sci.* 2021, 8, 202003738.

D18-I-21

AIE 辅助解析仿生纳米复合材料的增韧机理

程群峰*

北京航空航天大学

轻质高强高分子纳米复合材料是解决航空航天领域小型化、轻量化等瓶颈问题的重要材料，石墨烯、碳化钛等二维纳米片具有优异的力学和电学性能，但是其高分子复合材料的性能远低于预期值。我们研究发现影响高分子二维纳米复合材料性能的一个关键因素是孔隙，如何消除孔隙提高纳米复合材料的性能是该研究领域的一个巨大挑战。

研究团队采用聚焦离子束-扫描电子显微镜和纳米 X 射线断层扫描 (nano-CT) 等技术重构了高分子二维纳米复合材料的结构，颠覆了高分子二维纳米复合材料紧密堆积结构的传统认知。研究团队提出了有效降低孔隙率的有序界面交联和外力诱导取向相结合的策略，大幅提高了二维纳米材料的规整取向、组装密实度以及界面强度，提高了高分子二维纳米复合材料的力学性能，同时提高了复合材料的耐疲劳、抗氧化、抗应力松弛性能，获得了一系列高性能纳米复合材料^[1-5]。

参考文献:

- [1] S. Wan, X. Li, Y. Chen, N. Liu, Y. Du, S. Dou, L. Jiang, and Q. Cheng*, High-strength scalable MXene films through bridging-induced densification. *Science* 2021. 374, 96.
- [2] S. Wan, Y. Chen, S. Fang, S. Wang, Z. Xu, L. Jiang, R. H. Baughman* and Q. Cheng*, High-strength scalable graphene sheets by freezing stretch-induced alignment. *Nat. Mater.* 2021. 20, 624.
- [3] S. Wan, X. Li, Y. Wang, Y. Chen, X. Xie, R. Yang, A. P. Tomsia, L. Jiang and Q. Cheng*, Strong sequentially bridged MXene sheets *P. Natl. Acad. Sci. USA.*, 2020. 117, 27154-27161.
- [4] T. Zhou, C. Wu, Y. Wang, A. P. Tomsia, M. Li, E. Saiz, S. Fang, R. H. Baughman, L. Jiang and Q.

Cheng*, Super-tough MXene-functionalized graphene sheets. Nat. Commun., 2020, 11, 2077.

[5] T. Zhou, H. Ni, Y. Wang, C. Wu, H. Zhang, J. Zhang, A. P. Tomsia, L. Jiang and Q. Cheng*, Ultratough graphene – black phosphorus films. P. Natl. Acad. Sci. USA., 2020, 117, 8727-8735.

D18-O-68

方解石介观晶体的形成机制

邹朝勇*、汪琦航、傅正义

武汉理工大学

无定形相如无定形碳酸钙和无定形磷酸钙在形成具有独特形貌和优异性能的生物矿物中具有重要作用。介观晶体在生物矿物中广泛存在，其通常是在聚合物等添加剂的作用下通过纳米颗粒的定向组装形成。然而，介观晶体的形成机制仍然难以捉摸。受海胆棘中含镁方解石介观晶体的矿化过程启发，我们发现，在其他无机离子如锌离子的作用下，无定形碳酸钙纳米颗粒同样可以通过聚集结晶的方式形成方解石介观晶体。此外，我们证明，与纯溶液相比，锌离子可以在碳酸钙浓度显著降低的情况下诱导形成亚稳态的无定形纳米颗粒，这对其在方解石生长过程中的附着和包覆非常有利。阳离子介导的颗粒附着结晶显著提高了我们对生物矿化中介观晶体形成机制的理解，并为生物过程启示的材料制备新技术提供新的思路。

D18-O-69

医用结构材料的仿生强韧化设计与制造

高怀岭*

中国科学技术大学近代力学系

轻量化和强韧化是各领域结构材料所追寻的永恒目标。在生物医疗领域，牙科、骨科等各类临床疾病导致患者对硬组织修复或替代的轻质强韧医用结构材料具有巨大应用需求。但是，由于强度和韧性的互斥性，如何实现人工结构材料强韧化一直是材料科学领域面临的关键挑战。自然界中各种生物体在长期的进化过程中，为了满足捕食、防御或结构支撑等功能需求，可以利用简单的矿物与有机组分作为基元，通过生物过程合成出多种力学性能远超人造材料的生物结构材料。大量研究揭示这些生物结构的强韧化机制来源于其所进化出的共性结构特征：由结晶态的纳米基元和非晶态的有机物基质有序地组装构成天然的纳米复合材料，并且具有复杂精细的多尺度有序组织结构。我们围绕当前生物医疗等领域对强韧性人工结构材料的迫切应用需求，聚焦该研究领域所面临的关键科学问题，从生物材料的多尺度结构特征和强韧化机制中获取灵感，结合力学设计原理，进行合理的跨尺度强韧化结构设计，以纳米生物陶瓷和聚合物为主要构筑基元，发展可控、高效的先进增材制造新原理、新方法和新技术，以期构筑具有重要临床应用价值的轻质强韧医用结构材料。

D18-O-70

高分子胶体的非平衡自组装及可编程性能研究

李云峰*

吉林大学超分子结构与材料国家重点实验室

生物体需要能量的持续供给来维持高级的组装结构和智能功能，这一非平衡自组装维持着生物体的生命活动。例如，通过消耗能量分子，例如三磷酸腺苷（ATP）或者三磷酸鸟苷（GTP），细胞内的微管蛋白通过耗散自组装来对其自组装结构和过程进行时空控制，进而调节一些重要的生物学功能，包括细

胞增殖、迁移和信号传导等。受这种非平衡自组装的启发，我们开发了一种 ATP 驱动的具有良好生物相容性的聚合物纳米粒子的非平衡自组装体系，该体系可以实现时间可编程的小鼠淋巴结体内成像。该体系主要包括三个组分，即带正电荷的聚合物、ATP 和磷酸酶。通过改变这些成分的浓度，瞬态聚合物纳米粒子的寿命从几分钟调控到几百分钟。通过用 ATP 为体系补充燃料，可以获得多达 11 次聚合物纳米粒子的耗散自组装循环。有意思的是，这种耗散自组装体系可以通过冷冻来暂停，并且在冰箱中储存至少 45 天后，耗散自组装行为能够恢复。更重要的是，聚合物纳米粒子的耗散体系具有良好的细胞相容性。此外，利用磺基花青染料(Cy5)修饰的聚合物作为构筑单元，聚合物纳米粒子在时间上自我调节荧光强度，其可以对淋巴结进行时间可编程的体内成像。

D18-O-71

荧光变色高分子水凝胶

路伟*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

像变色龙皮肤一样能够“感知”外部环境变化并产生自适应变色响应的软湿态荧光变色高分子水凝胶是仿生智能高分子材料研究的重要方向，在环境共融软体机器人、智能显示和可视化传感检测等新兴应用领域具有重大潜力。然而，该材料尽管近年来快速发展，但潜力远未完全展现，主要面临以下重要挑战：(1) 荧光变色范围窄，难以实现外界刺激下的宽范围连续变化；(2) 功能单一，难以通过多功能协同效应来推动应用研究。近年来，我们针对此类材料“变色范围窄，功能单一”等限制其进一步发展和应用的挑战和难题，重点围绕“荧光水凝胶的仿生结构构筑→多功能协同行为调控→应用拓展”开展系列研究，取得如下创新成果：(1) 模仿变色龙皮肤等生物变色材料中不同色素细胞有序排列多层结构，提出“仿生多级结构设计”的水凝胶制备新方法，有效实现凝胶体系中各荧光团发光强度在不同外界刺激下的独立、连续调控，拓宽高分子水凝胶的荧光变色范围至全可见光谱；(2) 提出类变色龙的变形变色多功能协同新机制，通过多材料非对称界面复合构筑一系列多功能协同仿生智能荧光变色器件，丰富了荧光变色水凝胶的功能性；(3) 根据具体应用场景需求，开展界面复合各材料的针对性分子和结构设计，充分利用多材料的功能协同效应，推动了荧光变色高分子水凝胶在智能显示和可视化传感检测等前沿领域的应用。

D18-O-72

基于超浸润界面原理制备一维仿生传感器

姜翔宇*

北京航空航天大学

传感器件是未来智能化机械设备、高精度机床及智能机器人等高端工业设备必不可少的元器件，传感器的灵敏度和精确度决定了这些设备的技术水平和性能。提高传感器的灵敏度已经成为传感领域的研究重点和难点。一维传感器元件具有更大的比表面积以及更高的材料利用率，能大幅度提高传感器的灵敏度，通过对生物体内的一维结构的仿制，利用基于超浸润界面原理对材料溶液的精确调控，制备的仿生气体，磁场传感器件在灵敏度上有着大幅度的提升。

D18-O-73

仿生热辐射材料

周涵*

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。提出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。先后发现并揭示了大白花金龟、尖翅银灰蝶、银白色天牛、菜粉蝶、蝉绒毛的生物温控现象，并基于光学模拟和实验手段提炼出光子结构模型，揭示其光学机制。揭示了奥古斑粉蝶黄色翅膀的选择性波段响应机理，提炼出在可见光短波、长波波段中能分别引起高吸收、高反射的微球、微球加框架光学模型。发现了尖翅银灰蝶腹部的银白色结构色效应，提炼出由具有贝塞尔形状的脊和随机孔组成的功能基元按无序方式排布的宽带反射模型，揭示了该模型的混合色效应以及由衍射引起的方位角反射率依赖性，揭示了宽带反射蝶翅具有生物热控效应的机理。发现并提炼出大白花金龟白色鳞片上的壳/空心圆柱光子结构模型—由功能基元空心圆柱按密排圆周序构组成，揭示了基于薄膜干涉、米散射、全内反射机制的协同耦合所致可见高反射和基于折射率递减效应的中红外高发射机制。发现并提炼出蝉绒毛半椭圆柱光子结构模型，揭示了基于米散射和内部多次全内反射的协同作用提升可见高反射的光学机制。

相关研究构筑了仿生微结构聚偏四氟乙烯 PVDF/SiO₂ 辐射冷却薄膜，由纳米孔、微米网格、微米球通过无序形式排列。采用紫外光刻和纳米压印结合的方法构筑仿生微结构 PDMS/Al₂O₃/SiO₂ 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。所创制的仿生微结构聚偏四氟乙烯 PVDF/SiO₂ 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(0.25-2.5 μ m)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 1000W/m² 的太阳光照下实现最高 6℃ 的降温，辐射降温功率达到 61W/m²，且薄膜具有较好的柔性与强度。

相关研究发表在 PNAS (2020, 117, 14657)、Adv. Funct. Mater. (2020, 30, 1907562)、Adv. Funct. Mater. (2022, 2212068)、Laser & Photonics Reviews(2022, 2200635)、Adv. Funct. Mater. (2022, 32, 2203789)、Adv. Funct. Mater. (2022, 32, 2201906)等杂志上。

D18-O-74

仿生柔性电子、光子材料与人工智能辅助生物信息分析

李风煜*

暨南大学

针对环境与人体的复杂组成体系，申请人通过功能集成与柔性可穿戴传感器改善实时监测的体验性，利用人工智能算法实现复杂体系分析。通过构建柔性光子晶体凝胶材料，探索不同化学物质对水凝胶网络的 Hofmeister 效应，调节凝胶光子晶体结构的弹性模量，实现了单一普通化学传感器对多重（12 种）金属阳离子、14 种糖类分子的分析。设计构建导电水凝胶电极器件，利用可调的弹性模量，在应对外界不同的拉伸应力变化时给出细微的差异化电阻变化响应，贴敷在人体的不同肌肉群，运用多通道统计分析，则可以对不同的肌肉动作进行高灵敏的肌电识别与肌肉疲劳状态监测。针对实际检测应用中的实用性，通过设计新型的高集成多底物识别传感器芯片，发展高效化学与生物传感器，可以为适用于复杂目标与环境识别的便捷传感器器件提供具有重大意义的思路、方法与工艺。近年来，随着人工智能的不断升级和衍化，交叉响应传感阵列被集成化为可携带器件、可穿戴器件，更加便利和广泛应用于人们的生活当中。

D18-O-75

“矛与盾”式生物竞争启发的高性能仿生结构力学设计方案

吴开金*，倪勇

中国科学技术大学

自然界“矛与盾”式的捕食者与被捕食者之间的生存竞争是提升生物结构材料力学性能的驱动力。“师

法自然”，利用多尺度力学方法提炼生物材料“结构-界面-性能”间的内在联系，可以为高性能仿生结构材料的制备提供新的力学设计方案。受螳螂虾和贝壳间的生存战启发，我们结合砖块灰泥交错结构和 Bouligand 结构设计了一种非连续纤维 Bouligand 结构，3D 打印样品的断裂测试表明该结构具有最优断裂韧性和对裂尖取向不敏感性，混合断裂力学模型揭示该优异力学性能起源于裂纹扭转和纤维桥联间的竞争与协同作用。最后，我们给出通过调控裂纹桥联韧性、螺旋角、纤维长度和扭转角的分布实现适应不同加载方向的高韧性仿生复合材料的优化设计方案，并应用该方案合成了兼具高强度、高韧性和高抗冲击性的仿生非连续纤维 Bouligand 结构材料。

同时，我们从“含内应力贝壳抵抗螳螂虾击打”的自然现象受启发，提出增强仿珍珠层结构抗冲击性的预应力策略。通过系统的力学模拟、3D 打印和实验测试，分析了滑移、脱层、裂纹扩展等多种耗能模式间的协同与竞争，揭示了预应力策略和砖块滑移间的协同耗能效应，发现在临界预应力下，预应力增强砖块滑移和预应力削弱结构完整性间的竞争妥协机制导致抗冲击性优化。进一步，该预应力策略成功地应用于我们设计的仿珍珠层结构电池隔膜，显著增强锂电池的抗冲击安全性和电化学性能。

参考文献：

- [1] Wu Kaijin, et al. "Discontinuous fibrous Bouligand architecture enabling formidable fracture resistance with crack orientation insensitivity." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117.27 (2020): 15465-15472.
- [2] Wu, Kaijin, et al. "A Prestressing Strategy Enabled Synergistic Energy-Dissipation in Impact-Resistant Nacre-Like Structures." *Advanced Science* 9.6 (2022): 2104867.

D18-O-76

基于 MOF 光子晶体的分子尺寸和同系物的检测

徐洪波^{*}，李焱^{*}

哈尔滨工业大学

光子晶体传感器因具有可视化检测的特性，被认为具有良好的实际应用前景，但是目前光子晶体传感器对有机分子尺寸、手性及同系物检测能力亟待提高。MOF 材料具有孔道尺寸、手性及化学性质可调的特点，能为分子手性及尺寸的筛分和吸附/脱附提供界面，其可通过化学环境的调控控制吸附/脱附速度，可有效改善上述问题。

基于上述，本文提出通过自组装 MOF 光子晶体的策略，将分子在 MOF 微米孔道中的扩散系数与反射光谱恢复时间对应关系，在结合 MOF 光子晶体的位实现分子尺寸和同系物的区分。线性分子（如正己烷、甲醇、乙醇、丙醇和丁醇）分子尺寸较小，能进入到 MOF 的孔道中，实现峰位较大偏移（约 50nm）。对环己烷、苯、甲苯和二甲苯等圆状分子尺寸较大，不能进入 MOF 孔道中，峰位偏移较小（<4nm）。在甲醇、乙醇、丙醇，丁醇和正己烷的情况下，ZIF-8 光子传感的反射峰表现出相似的波长偏移，但他们的恢复时间不同分别为 2 分钟、3 分钟、15 分钟，150 分钟和 85 分钟。因此，可以通过观察特征回复时间来区分甲醇、乙醇、丙醇、丁醇和正己烷。此外，我们将每个蒸气种类的扩散系数与预期光学恢复时间联系起来的简单模型，与实验结果很好地吻合。

D18-O-77

生物复合材料的尺度结构和增韧机制

黄威^{*}

华中科技大学

轻质高性能的结构和材料在航空航天、能源和国防等领域扮演着重要的角色。自然界的生物结构材料如贝壳、骨、牙齿等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。不同于传

统的工程材料，生物材料往往具备了从微观纳米级到宏观毫米级的多层级结构，而这些多层级结构赋予了生物材料在力学性能上的独特的优势。由天然角蛋白材料构成的马蹄和羊角等生物组织，具备了轻质和抗冲击的特点，并且在持续冲击和大变形后能自愈合；螳螂虾可以以 10000g 的加速度使其前螯在极短时间内达到 20 米/秒的速度，高速冲击并破坏海螺等表层硬质外壳，从而获得食物。螳螂虾前螯在数千次地高速冲击后保持完整而没有损坏，表现出显著的高应变率下的抗冲击性能；石鳖牙齿由最坚硬的天然矿物氧化铁所构成，其柱状微观结构提高了材料的韧性和耐磨性能。通过解析自然界的生物材料的多尺度结构，以及结构和性能之间的关系，我们可以采用先进的制造和加工方法，仿生制备高性能的工程材料。

关键字 生物复合材料；多尺度结构；力学性能；增韧机制；仿生制备

D18-O-78

定向冷冻法制备各向同性高导热纳米复合材料

赵妮芳¹、柏浩*²

1. 浙江大学衢州研究院

2. 浙江大学

大功率、高频电子器件的高度集成化会产生严重的热量集中问题，对设备的工作稳定性与安全可靠产生严重威胁。为了解决散热问题，热界面材料通常被应用于电子封装中以降低散热器件与发热器件之间的接触热阻，提升芯片的散热能力。理想的热界面材料需要具备各向同性的高热导率，以确保在面外方向上热量可以有效地从热源传递到散热器以及在平面内局部的热量可以快速扩散。氮化硼聚合物复合材料具有高导热、电绝缘、低成本等优点，被认为是热界面材料未来的发展产品。然而，由于目前仍然缺乏有效的方式来构筑高连续性的氮化硼三维导热网络，在氮化硼聚合物复合材料中同时实现面内和面外的超高导热性仍然是一个巨大的挑战。本研究利用双向冷冻技术来构筑具有双轴取向结构的氮化硼三维导热网络，通过在大面积取向片层结构之间引入桥接结构，同时提升了氮化硼聚合物复合材料的面内和面外热导率。在 80 vol%氮化硼纳米片填充量下，复合材料的面内热导率达 39.0 W/mK，面外热导率达 11.5 W/mK，具有较高的各向同性。此外，当用作热界面材料给芯片散热时，复合材料表现出了优于商用热界面材料的散热性能，即使在 1000 次芯片开启和关闭循环后仍然可以保持出色的散热效果。本研究为开发高性能热界面材料提供了新思路。

关键字 热界面材料，热导率，双向冷冻，氮化硼纳米片，各向同性

D18-O-79

基于配位键的动态高分子材料

李承辉*

南京大学化学化工学院

动态高分子交联网络中含有可逆动态化学键，其网络结构可以在外界刺激作用下打开或重排，从而具有可控降解回收、再加工、再变形、自修复、焊接、刺激响应等性能。发展动态高分子是实现高分子材料可持续化及功能化的一条重要及有效途径。配位键是介于共价键和非共价弱相互作用之间的一种化学键，具有键能可调、结构多变、功能丰富的特点。我们通过对配位键的理性选择和调控，得到了一系列性质优异的动态高分子材料，例如自修复材料、变刚度材料、形状记忆材料等，它们在 3D 打印、特种胶粘剂、医疗支架、变刚度机器人、航空航天等领域有良好的应用前景。

参考文献：

- [1] C. H. Li#, C. Wang#, C. Keplinger, J. L. Zuo, L. Jin, Y. Sun, P. Zheng, Y. Cao, F. Lissel, C. Linder, X. Z. You, Z. Bao*, Nature Chemistry, 2016, 8, 619.
- [2] J. C. Lai, L. Li, D. P. Wang, M. H. Zhang, S. R. Mo, X. Wang, K. Y. Zeng, C. H. Li*, Q. Jiang, X. Z. You, J. L. Zuo, Nature Communications, 2018, 9, 2725.
- [3] J. C. Lai, X. Y. Jia, D. P. Wang, Y. B. Deng, P. Zheng, C. H. Li*, J. L. Zuo*, Z. Bao*, Nature Communications, 2019, 10, 1164.
- [4] C. H. Li*, J. L. Zuo*, Advanced Materials, 2020, 1903762.
- [5] Z. H. Zhao, P. C. Zhao, Y. Zhao, J. L. Zuo, C. H. Li*, Advanced Functional Materials, 2022, 2201959.

D18-O-80

Functional Nanomaterials and Peripheral Nerve Regeneration

Zhiwen Yan*, Yun Qian*, Cunyi Fan

Shanghai Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine

The understanding of nanomaterial biology determines material selection and scaffold fabrication in regenerative medicine. The translational application of advanced functional nanomaterials, like graphene and derivatives, requires an in-depth investigation on the sophisticated material-cell action network. To achieve the therapeutic convergence between biocompatibility and bioeffectiveness, herein, we screen a series of graphene derivatives and confirm the superiority of graphene oxide quantum dots (GOQDs). Thereby, we fabricate a GOQD functionalized nerve scaffold for peripheral nerve repair with electrospinning and freeze-drying technology. The behavioral, electrophysiological, and pathological analysis confirms that GOQDs promote nerve structural reconstruction and attenuate denervation-induced myopathy. Macrophages perceive the implanted materials and initiate a variety of biological processes. GOQDs activate the macrophage ERK/CERB/VEGF pathway both in vitro and in vivo, thereby contributing to intraneural vascularization. In addition, an enzyme-activated degradation route of GOQDs is explored and the implanted scaffolds trigger negligible scar formation and blood toxicity. Our findings demonstrate the ability of the GOQD, a biocompatible graphene derivative, to facilitate intraneural vascularization and regeneration of injured peripheral nerves through a macrophage intracellular signaling-mediated mechanism. This enlightens us to continuously explore the mechanisms behind the material nanobiology-dependent therapeutic convergence between biocompatibility and bioeffectiveness for clinical translation.

D18-I-22

用于疾病诊疗的生物活性高分子材料的研究

张先正*

武汉大学

近年来,面向生物医学领域的重大需求,研究人员提出生命功能活化的生物活性纳米材料的概念。这类“活”纳米材料将生命功能基元的复杂生物功能整合到材料,建立高级生物功能协同。课题组利用天然来源的生物活性物质与生命功能基元包括多肽、蛋白、细胞、细菌、微生物及其组分活化的纳米材料,在多种疾病的精准治疗方面显示出巨大潜力。我们系统研究了多肽、蛋白等生物活性材料在疾病治疗中的应用;在细胞基生物活性材料中,以细胞为来源,我们提取生物活性细胞膜进行改性,并进一步构建了人工(融合)细胞、中性粒细胞等具有独特治疗功能的材料;在细菌基生物活性材料中,我们提出多种工程化改造细菌的策略,并进一步构建微纳米材料整合的人造微菌群载体实现复杂的治疗功能。此外,我们还建立了包括噬菌体、病毒、微藻在内的其他来源生物活性材料的功能强化纳米系统,成功

应用于肿瘤等疾病的诊疗，显著提高疾病治疗的有效性、稳定性与安全性。

D18-I-23

手性水凝胶

冯传良*

上海交通大学

生物医用材料在器官移植、组织修复、心血管重大疾病治疗等领域有着不可替代的作用。但由于生物医用材料仿生还原生物物质的功能、性能和结构等方面还存在很多瓶颈，其功能性、免疫性等是亟待攻克的重大难题。其中，手性结构作为生命体内物质基本属性是决定材料免疫性特征的一个关键因素，手性特征对生命体系的影响也被美国 *Science* 杂志列为 125 个科学前沿难题之一。生物医用材料能高效仿生生命体物质的手性特征既是前沿基础科学问题，又是调控材料免疫效应的关键，是新一代生物医用材料的核心。基于此，开展了生物材料的手性定制研究，攻克了生物材料组装过程中手性特征从分子水平向超分子水平、再到材料宏观水平多重传递的难题，实现了水凝胶材料从无手性到多层级手性结构精准构筑的新跨越，揭示了手性凝胶材料制备中手性传递放大及调控的规律和机制，发现了手性结构与组织细胞选择性作用的构效关系。同时可定制手性结构为获取高效偏振光、识别、缓释等开辟了新的研究思路。

D18-I-24

仿生超浸润材料

刘克松*

北京航空航天大学

向自然学习是构筑新材料和新器件的重要途径。近年来，主要从事微纳米多尺度结构的仿生构筑与浸润性调控方面的研究工作。揭示了部分生物材料表面多尺度微观结构与宏观特殊浸润性之间的本质关系，为超浸润性材料的仿生构筑提供了依据；仿生制备了系列超浸润材料；提出了仿生多功能集成材料的设计理念。仿生构筑了系列多功能化材料，并开展了材料在油水分离、集水、微液滴输运等领域的应用研究。

关键字 仿生材料；多功能；超浸润

D18-O-81

仿生双曲面结构的构筑及性能

韩璐*

同济大学

三周期极小曲面及常平均曲率曲面是一类具有负高斯曲率的马鞍形双曲表面结构。这类结构广泛存在与自然界及两亲性分子自组装体系中，复杂且高度对称的曲面特性赋予了其优异的光学、力学、电学性能，在物理、化学、数学、生物、材料等领域都得到极大关注。

本课题组将多孔材料的反胶束液晶模板法与嵌段共聚物微相分离法相结合，创立了多溶剂多层微相分离法，与无机物种协同共组装得到了一系列双曲面结构。通过溶剂溶胀突破了嵌段共聚物微相分离晶胞尺度对聚合物分子量的依赖，将自组装晶胞尺度推进到 300 nm 以上。以上百种嵌段共聚物为模板，实现了从正胶束笼状、二维六方、层状到系列反胶束双曲面二氧化硅结构，特别是生物中存在的多种热力学亚稳态单套曲面常平均曲率曲面结构、再到反胶束二维六方及反胶束囊泡的制备，揭示了反胶束排列下

有机/无机界面曲率的变化规律，发现了各种结构转变的中间相态及转变机理，并拓展了这类仿生双曲面结构在光子晶体及力学材料方面的应用。

该工作拓展了仿生介观结构材料的制备方法及结构类型，对未来仿生功能材料的制备及理解生物体中复杂结构的形成具有重要意义。

D18-O-82

仿生纳米颗粒表界面的小角中子散射表征

罗智*

南方科技大学

蛋白质等生物大分子有着高度复杂的表界面结构。例如，具有不同亲疏水性质的氨基酸所组成的图案化表面决定了蛋白质的分子识别、自组装等功能。经典的连续介质理论往往难以对这类分子级别固-液界面的结构-性质关系进行预测。本项工作利用混合配体保护的纳米颗粒作为蛋白质结构的模型材料。结合蒙特卡洛等数据分析方法，本工作建立了小角中子散射、质谱等纳米颗粒表界面结构的表征方法，详细研究了多组分自组装单分子层在纳米尺度的复杂形貌。通过表征纳米亲疏水相区的浸润和水分子氢键网络结构，本工作证明了纳米尺度上表面能的不加和性。结合分子动力学模拟，提出了柯西公式在考虑分子级别相区边界效应后的新形式，为研究蛋白质行为、异相催化等现象提供理论指导。

D18-O-83

“类液体”聚合物刷防覆冰功能表面

刘杰*

中科院化学所

表面覆冰会导致室外设施（例如飞机、轮船、船闸和水坝、海上平台、太阳能电池板、风力涡轮机等）的严重故障或其性能的重大损坏，从而导致巨大的经济损失，甚至危及生命。通过再表面引入长期稳定、高效的低冰粘附表面可有效减少冰的附着，对于维持设备的正常运行至关重要。过去十余年，人们通过在表面引入油润滑层、自生成水润滑层或“类液体”聚合物刷润滑层有效地降低了冰的粘附强度。然而，同时具有优异的疏液性及稳定性的表面却通常因为制备工艺复杂、成本较高或稳定性差而难以实现工业化应用。针对这一问题，我们通过可控表面聚合，首次在 30 秒内实现了单端锚定、另一端自由旋转的低粘附聚二甲基硅氧烷聚合物刷的快速可控制备。该涂层可以有效地降低 10 余种高/低表面能液体在表面的粘附，从而实现表面不沾液体。聚二甲基硅氧烷的柔性分子链的高迁移率使得该纳米涂层可以表现出“类液体”的润滑能力。相较于大多数表面，该有机硅纳米涂层具有极低的冰粘附性能及稳定性，该方法简单易行，生产成本低，在表面防结冰领域具有巨大的市场前景。

D18-O-84

自主变形的驱动柔性智能材料

胡颖*, 吴玉程

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。模拟生物体的这一特性，设计出能够自主变形运动的软体机器人具有重要的基础研究和应用价值。作为软体机器人的核心组成之一，能将外部能量刺激转换为机械变形的柔性智能材料在近些年得到了广泛的发展。然而，目前大部分的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[1]。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[2]。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[3]。以上工作为设计自主型的柔性智能器件提供了新的途径。

参考文献：

[1] Lulu Yang, Longfei Chang, Ying Hu,* Majing Huang, Qixiao Ji, Pin Lu, Jiaqin Liu, Wei Chen, Yucheng Wu, Adv. Funct. Mater. 2020, 30, 1908842.

[2] Ying Hu,* Qixiao Ji, Majing Huang, Longfei Chang, Chengchu Zhang, Guan Wu, Bin Zi, Ningzhong Bao,* Wei Chen, Yucheng Wu, Angew. Chem. Int. Ed. 2021, 60, 20511.

[3] Ying Hu,* Lulu Yang, Qiuyang Yan, Qixiao Ji, Longfei Chang, Chenchu Zhang, Jian Yan, Ranran Wang,* Lei Zhang, Guan Wu,* Jing Sun, Bin Zi, Wei Chen, Yucheng Wu, ACS Nano 2021, 15, 5294.

D18-O-85

外场驱动水凝胶可控变形及其软驱动器

吴子良*

浙江大学

受到外界刺激时，捕蝇草的叶片通过快速跳转(snapping)变形实现猎物的捕获。通过双稳态结构实现跳转变形，对于软驱动器、软机器人的发展具有重要的科学意义。我们通过电场驱动实现了聚电解质水凝胶的可逆跳转变形。高度溶胀的聚电解质水凝胶受限于低溶胀的中性水凝胶，通过面外屈曲变形形成具有双稳态特征的穹顶构型。由于聚电解质水凝胶具有电场响应性，当穹顶形凝胶置于盐溶液并施加电场时，离子迁移导致凝胶厚度方向形成溶胀梯度，反向弯曲受到几何结构的阻碍，因而弹性能逐渐累积直到越过能垒，凝胶发生快速跳转变形。通过模拟自由离子在电场作用下的迁移行为，并将离子浓度分布与凝胶溶胀、收缩行为相耦合，揭示了电场驱动水凝胶跳转变形的机制。在此基础上，我们利用电场驱动可逆跳转变形，设计了水凝胶光控开关和仿生“捕手”。通过猎物位置识别、电场自动开启、自发驱动跳转等步骤实现了智能“抓捕”功能。此外，通过光控负反馈机制实现了电场方向的自动切换，进而以具有跳转能力的凝胶作为驱动单元，构筑了具有液体输运功能的“脉冲泵”。

D18-O-86

可程序控制的光热液体

蒋凌翔*

华南理工大学

利用液液相分离形成无膜细胞器的过程通常是由涨落引起的随机(stochastic)过程。特别是液滴成核的位置和时间难以控制；而成核以后液滴的生长也受到分子扩散、对流、融合等的影响，液滴尺寸也较难控制。在本文中，我们发展了一种基于激光光热效应的方法实现了在空间和时间上对于液滴形成/溶解以及大小的精确控制。具体来说，我们选取了一些具有升高温度诱导相分离(LCST)性质的体系，利用激光光镊对于镀金的薄膜进行定点加热，在局域形成一个温度场，导致等温面内发生液液相分离，形成位置和大小完全可控的液滴。利用这一原理，我们产生了多种非球型液滴、液滴阵列、和液体动画(liquid animation)；并进一步探索了客体分子的定点富集、转运、释放，以及时空可控的微反应器。

D18-O-87

仿生液体超铺展表面及其散热应用

鞠婕^{*1}, 刘岚¹, 周嘉嘉², 胡宁³, 姚晰¹

1. 河南大学
2. 华南理工大学
3. 浙江大学

液体铺展在生物医药分析, 发热表面散热, 海水淡化, 石油开采灯很多领域都有重要应用。对于这些领域内的任何一项应用, 液体在表面上快速, 大面积铺展都非常关键。然而, 虽然经过了很多的努力, 获得兼具优异铺展动力学及宽范围铺展面积的表面依然是一个大的挑战。受天然生物表面-源自热带的芦莉草的叶子-启发, 我们在本工作中展示了一种新型的六方排列的微米级乳突状结构设计。这种表面上液滴铺展的速度及面积均远远超出了目前已报道的人工超级铺展表面及天然芦莉草叶子表面。1 微升液滴在接触表面的 0.1s 内的平均铺展速度达到 54mm/s, 最大铺展面积为 560mm²。我们认为这种超级铺展的行为来自于沿液滴中心至液滴周围的拉普拉斯压差梯度及六方毛细管网络结构增强的毛细压的综合效果。由于液滴在该表面具有的这种空前的铺展性能, 表面液体挥发速度快, 从而产生显著的制冷效果。这种新的液体超级铺展表面有望在工业反应器, 集成电子器件制冷系统, 医疗诊断测试领域展示巨大的应用潜能。

D18-O-88

仿生超铺展动力学机理研究与应用

苗伟宁*, 田野, 江雷

中国科学院理化技术研究所

根据 Thomas Young 在 1805 年提出的杨氏方程, 热力学稳态接触角被广泛用于表征表面的浸润性, 并根据其定义宏观稳态接触角小于 5°的表面为超亲液表面。但该表征方法在描述液体的动力学铺展过程时, 显示出巨大的局限性。我们提出在描述液体动力学铺展过程时, 应该使用超铺展 (Superspreading) 这一概念, 而不是经典的超亲液概念 (Superhydrophilic/ Superlyophilic), 并建议使用超铺展时间 (Superspreading time, ST, 一滴液滴从接触表面到完全铺展至接触角达到 0°所需要的时间) 或者铺展半径随时间变化曲线 (Superspreading Radius versus Spreading Time, SRST) 来定量表征这些表面的动力学铺展性质。我们发现动物角膜表面具有非常显著的超铺展性质 (超铺展时间为 830 ms), 这种特殊的性质是由角膜表面独特的微米槽道环绕纳米线阵列结构赋予的。我们研究并仿生制备了类似的结构, 详细证明并阐述了纳米线阵列和微米槽道这两种尺度的结构各自在超铺展过程中所起的作用: 即纳米结构赋予表面超铺展的性质、微米结构由于其内较小的粘滞阻力主导液体的铺展速度。这一结论区分了微纳协同作用中微米和纳米结构在超铺展表面各自所发挥的作用并与其他超铺展表面结构的设计提供了指导原则。进一步, 我们证明了超铺展表面既可以用于制备高性能隐形眼镜, 又可以用于制备高性能柔性应变传感器, 展示了超铺展表面的巨大应用潜力。

D18-O-89

基于仿生纳米结构的内界面相及其设计对力学性能影响机理的研究

王彬*, 夏和萍

香港城市大学

天然强韧材料因多层级跨尺度结构而具有优异的比强度和高韧性, 为仿生高性能复合材料的设计与研发提供重要启示和指导。已发现仿生纳米交错排布结构普遍存在于例如贝壳珍珠质、骨等强韧兼优的

天然材料。其中伴随该纳米结构的纳米尺度内界面相，深刻影响结构组元之间的应力传递和变形损伤机制，对材料整体力学性能至关重要。目前仅有针对仿生纳米交错排布结构的界面研究（二维数学界面），但实际上该界面相具有与增强体相当的纳米尺度，其厚度和应力传递行为不容忽视。由此，本工作针对仿生纳米交错排布结构，建立增强体-界面相-基体三相微观力学模型，基于剪切滞后理论，考虑多片层相互作用以及基体剪应力分布，推导获得含有内界面相几何结构参数与力学参数影响的应力分布以及等效模量表达式，解析微观内界面厚度、排布及材料属性与宏观力学性能的理论关联，将此理论解析模型与有限元数值模拟进行验证，并与其他模型对比分析。研究发现，内界面相显著影响等效模量（影响规律呈现非线性），并且调控其几何结构参数从而协同优化强韧性的效果相比于调控其力学参数（例如杨氏模量）更加优越。

D18-I-25

靶向植物病毒的新型手性农药

高锐，徐丽广，孙茂忠，胥传来，匡华*
江南大学食品科学与技术国家重点实验室

最近，我们用 L-/D-青霉胺修饰硫化铜纳米粒子得到~3nm 的手性纳米颗粒，其尺度与构象与烟草花叶病毒外壳蛋白形成的内孔尺度匹配。研究发现，D-青霉胺手性纳米颗粒对 TMV 衣壳孔内的 Gln99~Ala105 片段具有高亲和力，可以稳固结合在孔内部。这种尺寸和形貌与植物病毒衣壳蛋白匹配的手性纳米农药能够以偏振光依赖的方式，特异性地水解剪切烟草花叶病毒衣壳蛋白单体第 101 位天冬酰胺和第 102 位脯氨酸之间的酰胺键，使得病毒整体结构被破坏，从而实现高效杀灭植物病毒效应，可以作为新型手性纳米农药。一次喷洒后，该手性纳米颗粒可以通过叶面气孔快速被作物吸收，可以在 3 天内清除 95% 的病毒颗粒。其效率高于目前所有的植物抗病毒试剂。

D18-I-26

仿生多尺度粘附界面材料

王树涛*
中国科学院理化技术研究所

生物界面粘附是界面化学研究中的前沿热点之一，不仅有助于我们了解生命的奥秘、还对发展新型功能界面材料和相关技术有着重要意义。向自然学习，为发展新材料源源不断的提供新原理和新思路。近年来，我们研究了几种生物界面上的特殊粘附现象，并受此启发发展了系列仿生粘附可控界面。1）揭示了鸟类羽毛耐撕裂的性能是源于羽毛上的钩-槽-钩机械级联互锁结构，颠覆了传统认为的简单钩-槽互锁结构；发展了仿蜻蜓干态粘附材料，解决了传统仿苍耳尼龙粘扣已坏、噪音大等问题；发展了仿肾小管内壁的抗矿物粘附界面材料；2）提出结构匹配和分子识别的协同仿免疫界面识别理念，利用化学刻蚀、气相沉积、电化学沉积、模板复形、电纺等技术构筑了系列仿免疫 CTC 捕获芯片；提出界面乳液聚合方法，构筑了系列形状可控（从 Janus 到多孔）与表面化学可控的仿免疫磁珠微球；3）揭示了伤口血痂的微观结构，构筑了系列仿血痂伤口辅料，有效的促进了伤口的愈合。

D18-I-27

基于固态纳米孔/通道的分析检测

夏帆*
中国地质大学（武汉）

人们在细胞中发现，1-100 nm 范围内种类不同的跨膜孔和离子通道。这些跨膜孔和离子通道在诸如

维持细胞渗透压平衡和稳定细胞体积等生理活性起着至关重要的作用。受此自然现象的启发，科学家们制备了具有不同特征的仿生纳米器件（纳米孔/通道）。这些仿生纳米器件已经成为一个有吸引力的平台，具有广泛的应用。一般来说，基于固态纳米孔/通道分析的原则如下：分子进入或附着在纳米孔/通道的内表面，改变纳米孔/通道的有效直径，或影响电荷转移以及内表面的润湿性，从而导致离子电流的变化。

D18-O-90

多肽基功能生物界面用于肿瘤细胞检测与分离

刘磊^{1*}，白蒙起²，田小花³

1. 江苏大学新材料研究院

2. 江苏大学新材料研究院

3. 江苏大学化学与化工学院

摘要内容：功能性仿生生物界面由于其独特的界面结构和卓越的界面性质，可被广泛应用到各个领域，尤其在疾病标志物的精准检测中发挥重要作用，因此备受关注。界面构建过程中涉及界面化学问题，其中对界面可控设计和化学性质调控是决定生物界面功能的关键，成为物理化学学科关注的难点和重点之一，也是其进一步用于疾病诊疗的理论基础。然而，可控设计的智能生物界面的构建一直存在挑战，主要原因在于界面化学中按需接枝到界面组分结构与化学性质的复杂性和多样性给界面物理化学性质的有效调控带来困难，尤其对于功能性的界面构建，考虑因素相对更加复杂，因此提出有效的界面可控设计策略是突显重要。界面化学中的具有不同化学性质的分子基元设计、基元间相互作用的有效利用与调控是解决上述问题的理论基础。因此，设计基元、调控界面基元间共价、非共价的相互作用，结合表界面修饰、表界面聚合、表界面组装的方法，提出界面可控设计策略，调节界面物理化学性质，实现生物界面的功能性要求（靶向性、智能响应性、抗污性、高灵敏性等），最终用于疾病标志物的精准检测和分离成为报告人的研究重点。具体分为以下两个部分：1）共价化学策略：动态共价化学和生物正交化学结合构建多肽基智能生物界面。2）非共价化学策略：分子可控组装构建多肽智能生物界面和传感界面。

关键词：仿生生物界面；多肽自组装；动态共价键；界面化学

参考文献

- [1] **Liu, L***, et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2018, 57, 7878
- [2] **Liu, L**; Klausen, H L; Dong, M D*. *Nano Today*, 2018, 23, 40
- [3] Song, Y X; **Liu, L***; Wang, K T; Dong, M D*, et al, *Nano Letters*, 2022, 22, 3707
- [4] Tian, X H; Pan, G Q*; **Liu, L***; et al. *Chem. Eng. J.* 2020, 398, 125620.
- [5] Tian, X H; **Liu, L***; Pan, G Q*; et al *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019, 11, 41019

D18-O-91

非均质浸润设计及固液行为控制

李会增*

Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences

液体在固体表面的动态行为控制是生活及生产中非常基础而关键的问题之一。液体与固体间的相互作用，很大程度上受到固体表面性质，尤其是浸润性和粘附力的影响。对固体表面性质进行设计，进而实现对液体行为的控制，对于喷墨打印、防结冰、农药喷洒等领域具有重要意义。相比于均匀疏水或亲水表面，非均质浸润表面兼具亲液区域对液体的粘附及疏液区域对液体的排斥作用，能够对液体行为进行更加精确而复杂的控制，因而引起了极大的研究兴趣。本研究通过在固体表面设计分子层厚度的浸润性图案，结合对图案对称性（镜面对称性和旋转对称性）的设计，实现了对液滴碰撞固体表面过程中受力和力矩的精确控制。在此基础上，开发了基于墨滴快速自切割的新型打印技术，利用单墨滴即可实现功能材料复杂图案化；首次实现了液滴碰撞后平动向转动的转变，提出了新型的液滴能量收集方式；对

液滴内部流场的不对称性进行控制，抑制了液滴碰撞后的 Plateau-Rayleigh 失稳现象，提高了压电器件的能量收集效率。相关研究成果发表在 Nature Communications, Science Advances, Proc. Natl. Acad. Sci., Angew. Chem. Int. Edit. 等期刊上，并被 Science, Nature Asia, New York Times, Phys.org, Daily mail, CGTN 等几十家国内外媒体报道。

D18-O-92

基于界面交联诱导致密化制备高强度碳化钛薄膜

万思杰，程群峰*

北京航空航天大学

和碳纤维相比，新兴的石墨烯、MXene 等二维纳米材料具有更加优异的力学和电学性能，是制备新型轻质高强高分子纳米复合材料的理想基元材料。但是这些纳米片在组装过程中易产生孔隙，导致高分子纳米复合材料的性能远低于预期值。由于二维纳米材料本征的力学性能远高于高分子基体，在外力作用过程中使得高分子纳米复合材料的真实结构被破坏。采用常规表征方法，例如电子扫描显微镜等，得到的是破坏后的结构形貌，掩盖了高分子纳米复合材料的内部真实结构。而传统检测碳纤维复合材料孔隙率的方法（如 micro-CT 和超声 C 扫描）检测限很难达到纳米级，因此，高分子纳米复合材料的内部真实结构，尤其是孔隙，常常被忽视。给高分子纳米复合材料领域的基础和应用研究造成了巨大困扰，严重影响了高分子纳米复合材料的发展和实际应用。

基于此，我们通过聚焦离子束扫描电镜（FIB-SEMT）和纳米 X 射线断层扫描（nano-CT）技术，系统表征了碳化钛 MXene 高分子复合材料薄膜的三维孔隙结构，颠覆了高分子二维纳米复合材料的层层紧密堆积结构的传统认知。进一步，我们开发了仿生界面交联致密化策略，制备了高强度 MXene 复合薄膜，其拉伸强度为 583 MPa、韧性为 15.9 MJ/m³、杨氏模量为 27.8 GPa，分别是未交联 MXene 薄膜相应性能的 6.7、12.2 和 4.6 倍；与此同时，该致密化 MXene 复合薄膜具有优异的电导率（6115 S/cm）和高效的电磁屏蔽性能（62876 dB.cm²/g）。再者，该致密化 MXene 复合薄膜相比于未交联 MXene 薄膜具有更加优异的抗超声破碎、抗疲劳、抗氧化和抗应力松弛性能。更重要的是，该高性能 MXene 复合薄膜可大规模制备，具有较大的商业应用前景。

D18-O-93

仿生二维材料层状分离膜

刘敬崇*

北京科技大学

膜的智能化会赋予分离膜崭新的功能，比如可响应缓慢施加的外界刺激来更加精确地控制膜的尺寸，从而衍生更多新的应用领域及突破现有应用性能上的壁垒。目前，可响应外界刺激而改变孔道尺寸的分离膜在环境与能源领域有着广泛的应用前景。将仿生思想应用于分离膜的设计中，不仅有助于推动新一代膜材料的开发，而且会有效提升分离膜性能，从而使其更好地应用于化工分离中，来解决现代社会所面临的一些重大挑战。受植物气孔在高温下会关闭这一生物功能启发，我们设计了一种具有温度响应性质的纳米门控薄膜，该薄膜可作为水阀门使用并且可实现小分子的精确分离。分离膜由二维材料氧化石墨烯与聚（N-异丙基丙烯酰胺）组成，两组分以共价键连接。我们通过调控温度可以实现该智能膜孔径的变化，从而对水的通过有较大开关比。此外，这一特性还使得该膜可以实现不同尺寸混合分子的梯度分离。最近，我们将该体系拓展到 MXene，WSe₂ 等二维材料，制备了具有增强抗污性能及超高水通量的纳滤膜。我们报导的这种仿生纳米门控薄膜拓宽了用于化工生产的分离膜范围，并且在智能门控系统和微流控化工领域有着潜在的应用。

D18-O-94**生物合成软体微型机器人在消化系统内的靶向递送**

王奔*

深圳大学

软体机器人作为机器人领域的一个重要分支，能够应对各种不确定的情况，通过改变自身形状来适应不断变化的周围环境，实现在复杂环境和狭小区域内的可控运动，因而在体内疾病的诊断和治疗方面具有重要的应用前景。结合生物杂化的思想，我们开发了一种基于干细胞的磁性软体机器人，可以用于生物腔道内长距离的干细胞靶向递送。该生物合成软体微型机器人无需生物支架，具有接近人体组织的模量和较好的弹性，且机器人内部的干细胞具有优异的活性，可向其他类型的细胞发生分化。通过控制外加旋转磁场的强度和方向，可实现生物合成软体微型机器人的高精度运动。此外，基于内窥镜、磁控单元、超声成像技术，我们开发了长距离微机器人递送平台，可以用于消化系统腔道内各个区域，甚至包括一些现有医疗技术还很难达到的狭小腔道内生物合成软体微型机器人的递送。相关研发结果，对于发展可以用于最小侵入医疗任务（特别是再生医疗）的智能医疗微型机器人铺就了道路。

D18-O-95**场效应晶体管生物传感器协同调控**

郑志*, 李海洋, 夏帆

中国地质大学（武汉）

场效应晶体管（FET）生物传感器具有集成度高、稳定性好、实时检测特性，在生物科学研究、医疗诊断、环境监测等领域具有重要作用。FET 生物传感器由 FET 部分和生物探针/靶标分子部分组成，目前研究者单独调控 FET 部分或者生物探针/靶标分子部分，其性能仍然具有较大提升空间。因此，开发新型检测策略以协同调控 FET 生物传感器 FET 部分和生物探针/靶标分子部分是构建高性能 FET 生物传感器的关键。本工作通过调控抗体探针分子修饰位点缩短生物探针分子到氧化铟薄膜 FET 沟道表面距离，构建针对卵巢癌标志物分子 CA125 的高灵敏 FET 生物传感器，对卵巢癌标志物 CA125 的检测具有较高的灵敏度，实现低检测限（100 nU/mL）的同时还具有较宽的线性响应范围（100 nU/mL ~ 1 U/mL）。进一步通过控制钝化层厚度及缓冲液浓度精确调控 λ_D 接近 MIN(LP, LP+T)（LP 为结合靶标之前探针分子高度，LP+T 为结合靶标之后探针分子高度）协同调控生物探针分子有效电荷浓度和氧化铟薄膜 FET 沟道导电电荷浓度，血清素的检测限可低至 5.0 fM，线性范围达到 10 fM 至 1.0 nM，并且扩展到多巴胺和葡萄糖的检测。通过调控氧化铟薄膜 FET 生物传感器栅极电压全面深入揭示生物探针分子与氧化铟薄膜 FET 沟道的相互作用对其检测性能的影响机制，有效提高 FET 生物传感器对端粒酶检测的灵敏度，实现极低的检测限（13 cells）和较宽的线性范围（100 ~ 5000 cells）。本论文协同调控氧化铟薄膜 FET 部分和生物探针/靶标分子部分增强氧化铟薄膜 FET 生物传感器性能，为开发高性能 FET 生物传感器提供了一种新的思路。

D18-O-96**仿生高强韧层状纳米复合材料**

赵创奇*

中科大苏州高等研究院

生物材料，例如骨骼，牙齿，贝壳等，其内部的高度有序结构及其连接的有机物基底共同作用，使这些材料表现出优异的强度、模量及断裂韧性。科学家们做出了很多尝试去模仿这些自然界中的精巧构造来进行层状结构材料的仿生制备。然而，连续大规模制备超强层状结构纳米复合材料仍然是该领域的

重大挑战之一。

为解决上述难题，我们提出了基于极稀反应溶液的液体超铺展制备策略。该策略不仅利用反应溶液在超铺展过程中产生的剪切液流实现纳米片的高度取向排列，而且利用高分子快速交联，同步实现取向结构的原位快速固定，从而制备出层状结构纳米复合膜。通过优化设计超铺展溶液中高分子和纳米材料的组成，制备出具有超高力学性能的纳米复合膜。重要的是，通过将单一液滴超铺展扩展为多通道的连续超铺展，设计了一套能实现层状结构纳米复合膜大规模连续制备的装置，实现了厚度均匀的层状结构纳米复合膜的连续大规模制备。另外，该方法具有优异的普适性，能实现多种纳米片的取向排列，实现多种高分子聚合体系的层状纳米复合膜的大规模连续制备。

D18-O-97

基于多孔冠醚晶体的仿生钠离子通道

高军*

中国科学院青岛生物能源与过程研究所

生物离子通道可以精准识别目标离子，具有高离子选择性。例如，钠通道的 Na^+/K^+ 选择性约为 10^2 ， $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 选择性约为 7。近几十年来，人们对构筑人工离子通道产生了极大的兴趣，这些人工离子通道可以模拟生物离子通道的某些功能，并由广阔的应用前景，如分子筛分、水处理、传感、能量转换和提锂等。然而，虽然以往的工通道能够以各种方式控制离子传输，但它们通常缺乏区分不同阳离子的能力。这是因为在细胞环境中存在的简单阳离子(如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})仅具有亚纳米大小，其大小差异范围最小小于 0.1 nm(裸 K^+ vs 裸 Na^+)，最大也不超过 0.2 nm(水合 K^+ vs 水合 Mg^{2+})。这两个因素对人工离子通道的构筑提出了极大的挑战：通道孔径必须足够小以准确识别目标离子，同时足够精确以排斥竞争性离子。此外，离子在纳米孔中的输运速率一般遵循 $\text{K}^+ > \text{Na}^+$ 的顺序，相反顺序的 $\text{Na}^+ > \text{K}^+$ 很少被发现。

在此工作中，我们模仿生物离子通道，构筑了由一种多孔冠醚晶体组成的仿生钠离子选择性器件。晶体由冠醚的空腔形成管状亚纳米孔，腔体最窄处为 0.26 nm，与生物离子通道尺寸相当。器件的 Na^+/K^+ 选择性为 15，与生物离子通道相当， $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 的选择性为 523，几乎比生物高两个数量级。结合实验与理论计算，我们提出这种选择性可能来自于尺寸效应和分子识别效应。

参考文献：

Tingyan Ye, Gaolei Hou, Wen Li, Chaofeng Wang, Kangyan Yi, Nannan Liu, Jian Liu, Shaoming Huang & Jun Gao. Artificial sodium-selective ionic device based on crown-ether crystals with subnanometer pores. Nat. Commun. 12, 5231 (2021).

D18-O-98

天然海胆疣的微观结构及力学行为研究

季洪梅*, 亓清洁, 李小武

东北大学材料科学与工程学院材料物理与化学系

海胆属于棘皮动物门，广泛分布在世界各地的海洋中，在浅海至 5000 米深的海底均有分布。海胆壳及其棘刺均为一种天然的多孔陶瓷材料，具有精密的孔隙分布、孔型结构和优异的力学性能，因此受到了研究者的广泛关注。但是，将棘刺与海胆壳连接到一起的疣的微观结构及力学行为却鲜见报道。海胆在遇到天敌时，一般利用棘刺进行防御，而在这种情况下，疣会受到棘刺的冲击，因此疣应具备一定减震吸能的能力。本文选取海胆壳上的疣为主要研究对象，对具有不同体积的疣进行了微观结构表征及不同加载速率（0.1 mm/min、0.5 mm/min、1 mm/min、2 mm/min、5 mm/min）下的压缩试验。结果表明，疣整体为多孔结构，且表现出明显的分层结构，外部区域为无序孔结构，中间区域为有序孔结构。沿疣

的纵向从上到下,有序孔结构区域逐渐增大,边缘的无序孔结构区域逐渐减小,直至消失。其中,有序孔结构的棱柱呈颈形,沿着疣的轴向有序排列,其内部由纳米级的矿物晶片堆叠而成。随着疣的体积的减小,有序孔结构所占区域逐渐降低,载荷-位移曲线逐渐由典型多孔材料断裂曲线向准脆性材料断裂曲线转变,从而造成疣的吸能能力逐渐降低。其中,拥有最大有序孔结构比例的疣的吸能率最高,且其对应变速率最敏感。有序多孔结构的吸能能力主要取决于其多尺度结构,能够有效避免孔周围的应力集中,且棱柱的片层结构能够引起裂纹的偏转,从而提高材料的抗断裂能力。

通过对疣的结构、性能进行研究分析发现,其结构与功能之间存在显著的适应关系。疣外部的无序孔结构能够承受一定的摩擦,与棘刺连接处的三明治结构能够承受一定的弯曲变形,使得棘刺能够更好的运动,而内部的有序孔结构具有一定的吸能作用,能够有效减少棘刺对海胆壳的冲击。通过海胆疣的结构与力学性能研究,对多孔结构的性能有更深入了解,能够为多孔结构仿生提供理论依据和新思路。

D18-O-99

纤维素纳米晶构建仿 Bouligand 结构仿生光学材料

曹渊渊*

华东理工大学

昆虫丰富的结构色与其背甲中的微结构息息相关,例如白金龟(Cyphochilus)甲虫的纯白色源于其无序多孔结构的白光散射现象,宝石甲虫(Chrysina gloriosa)的亮绿色来源于其螺旋层状的 Bouligand 结构对绿色左圆偏光的反射。对这些生物光学结构的模拟,能带来多种新型光学材料。在这里,通过分析液晶结构与生物光学结构的近似性,我们采用纤维素纳米晶液晶模拟 Bouligand 结构,并结合冰模板法模拟白金龟无序多孔结构,设计了兼具无序多孔结构以及层状 Bouligand 结构的多孔气凝胶材料,这两种结构在压力下的转变,导致该气凝胶的光学性质从模拟白金龟的白色光散射性质向模拟宝石甲虫的圆偏振光反射性质转变,实现了压力响应性变色气凝胶材料的构筑。^{[1][2]}此外,我们利用纤维素纳米晶液晶模拟 Bouligand 结构的分光行为,在磁场的辅助之下,构建了光栅参数可调的水凝胶光栅材料,实现了简单价廉的水凝胶光栅的合成。

参考文献

- [1] Y. Cao, L. Levis, W. Y. Hamad, and M. J. MacLachlan*, Adv. Mater. 2019, 50, 1808186.
- [2] Y. Cao, W. Y. Hamad, and M. J. MacLachlan*, Adv. Opt. Mater. 2018, 6, 1800412.
- [3] Y. Cao,† P. Wang,† F. D'Acerno, F. W. Y. Hamad, C. Michal and M. J. MacLachlan*, Adv. Mater. 2020, 32, 1907376.

D18-O-100

仿生制造具有极端力学性能的水凝胶

梁翔禹^{*1,2}, 刘吉²

¹中国农科院深圳基因组所

²南方科技大学

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[1-3],利用冷冻铸造和高温退火工艺,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 2 个数量级以上,同时不牺牲其高水含量($\leq 90\%$)。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)、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。

参考文献：

- [1] Xiangyu Liang, J. Liu*, et al. Anisotropically Fatigue-Resistant Hydrogels. *Adv. Mater.*, 2021, 33(30), 2102011.
- [2] Xiangyu Liang, Ji Liu*, et al. Bioinspired 2D Isotropically Fatigue-Resistant Hydrogels. *Adv. Mater.*, 2022, 34(8), 2107106.
- [3] Xiangyu Liang, J. Liu*, et al. Impact-Resistant Hydrogels by Harnessing 2D Hierarchical Structures. *Adv. Mater.*, 2022, in press.

D18-O-101

仿树根混凝土加固防护材料

张国梁，马春风*，张广照

华南理工大学

混凝土已广泛地应用于海洋工程、基础建筑、道路桥梁、水利水电中。然而，混凝土具有多孔结构，水和离子可通过孔隙渗入内部造成腐蚀。此外，混凝土也是一种刚性材料，在应力的作用下容易开裂失效。针对上述问题，我们受“大树扎根”仿生学原理启发，提出了“渗入-固结”策略，研制出高渗透混凝土防护、修复、加固材料。该材料具有低粘度、高润湿、可反应特性，不仅在混凝土表面形成涂层，更能深入混凝土内部形成“植根式”固结增强层，从而消除混凝土多孔介质的孔隙与微裂缝，使得混凝土表面防腐层厚度达毫米级，将其表面强度提高两倍以上，具有优异的抗渗透、耐腐蚀性能。特别是，该材料可作为承上启下层，通过引入氟化纳米金刚石构筑了“植根式”高耐久超疏水涂层。该三维立体防护涂层体系的水接触角可达 154° ，且经砂纸摩擦 100 次循环后，依然具有超疏水性，解决了当前涂层疏水性能与耐磨性能无法同时兼顾的问题。此外，该涂层还展现出良好的耐低温、抗冰、自清洁等性能。本报告将介绍相关进展情况。

D18-O-102

固态纳米孔蛋白质测序的分子动力学研究

刘瑞，王维博，夏帆*

中国地质大学（武汉）材化学院

蛋白质是生命的基本组成部分，是生物活动的主要载体。它们在能量储存、物质运输和免疫调节等方面发挥着重要作用。蛋白质的准确分析和鉴定对于促进我们对生物学的理解，解开生命科学的奥秘至关重要^[1]。纳米孔测序是一种高精度、高通量、低成本的单分子检测方法，拟采用分子动力学(MD)模拟技术深入了解多肽链通过纳米孔的动力学机制。通过在微观水平上探索蛋白质与纳米孔之间的相互作用，为纳米孔传感器的开发提供理论支撑。

我们采用全原子力场分子动力学模拟研究了各种氨基酸在固态纳米孔中的转运行为。通过计算力和离子电流的双信号，研究了氨基酸的特异性识别。利用不同几何形状的单层二硫化钼纳米孔来检测合适的纳米孔形态。为了进一步提高氨基酸的分化，将石墨烯与单层二硫化钼膜结合，复合纳米孔。

采用长度为25 Å和7 Å的MoS₂纳米孔(X7Y25-MoS₂)和长度为25 Å-long和10 Å-wide的MoS₂纳米孔(X10Y25-MoS₂)测试了力和电流双信号对检测的影响。采用X10Y25-MoS₂纳米孔进行传感模拟，力和电流双信号对不同氨基酸具有良好的信号分辨能力。验证了利用多维信号识别不同氨基酸残基的可行性。通过计算带电肽周围的离子浓度分布，研究了二硫化钼纳米孔对带电氨基酸和多肽的识别机制。

关键词：固态纳米孔；分子动力学；氨基酸识别

参考文献

[1] Zhang, S.; Huang, G.; Versloot R.C.A; *et al.* Nature Chemistry, 2021, 13(12): 1192-1199.

D18-P-01

藤壶水下粘着蛋白（cp19k）衍生多肽的设计及自组装研究

梁超*, 吴吉喆, 叶宗煌, 胡碧茹

国防科技大学理学院

多肽自组装具有广阔的应用前景。基于仿生分子设计的途径, 现已研发出不同类型的自组装多肽。然而, 要拓展多肽自组装的应用, 仍需不断设计新型自组装多肽。藤壶水下粘着蛋白——cp19k, 具有氨基酸组成不同的两类肽段交替重复的结构特点和形成纳米纤维及纳米圆环的自组装性质, 是仿生设计自组装多肽的理想模板。因此, 本研究分别以 cp19k 交替重复的两类共九条肽段为模板, 设计合成了 9 条 cp19k 衍生多肽, 简称为 P1-P9。结合原子力显微镜、透射电镜、圆二色谱、红外光谱及硫黄素 T 染色等方法, 发现衍生自 cp19k 蛋白中部和 C 端四条多肽, 即 P4、P6、P7 和 P9, 可以在酸性条件下自组装成形态各异的微纳结构。其中, P9 自组装成典型的淀粉样纤维; P7 类似于离子互补型多肽, 自组装成均匀分散、直径统一的纳米纤维; P6 具有双亲性的分子特点, 形成扭曲的纳米丝带; P4 同时自组装成螺旋的纳米纤维和新颖的线圈状结构。藤壶 cp19k 衍生自组装多肽的发现丰富了现有的自组装多肽, 具有重要意义。接下来将尝试其它的 cp19k 衍生多肽设计方式力求挖掘更多的自组装多肽, 并探索它们的生物医学用途。

D18-P-02

超分子自组装多态调控系统

赵远峰, 赵鹏, 郑宜君*

上海科技大学物质科学与技术学院

超分子自组装在生命体中具有十分重要的作用, 是生命体实现其智能化的原理之一。近年来, 有大量工作开发了多种人工超分子自组装体系。然而, 人工超分子自组装体系在结构设计、功能化和智能化等方面上仍远远逊色于天然超分子自组装体系。这主要是因为, 目前绝大部分工作都只能实现组装体单一形态的调控, 并且大都依赖于光、热等物理刺激手段; 而无法实现类似生命体系中多样化的介稳结构与组装进程的自发性控制。因此, 选择性地设计和合成具有多个组状态的自组装体系、精确控制其组装过程, 仍是一个巨大挑战。鉴于此, 我们设计了一种基于级联反应的超分子自组装体系, 利用巯基氧化和二硫交换反应的动力学速率差异, 实现组装体从纳米纤维到纳米球的多态转变。并通过控制投料当量和 pH, 实现对组装终态和组装体转变速率的控制。我们通过透射电子显微镜、共聚焦显微镜、圆二色光谱等手段对这一动态过程进行了跟踪, 并研究了组装体分子间的微观作用模式。此外, 我们还探索了该自组装体系在药物智能递送方面的应用。

D18-P-03

仿生树碳纳米管基光热蒸发体及其海水淡化性能研究

曹培¹, 侯旭^{*1,2,3}

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
2. 厦门大学物理科学与技术学院
3. 福建省能源材料科学与技术创新实验室 (IKKEM)

在全球不断工业化, 人口不断增加的形势下, 水污染变得越来越严重, 淡水资源短缺已成为全球面

临的困难之一。近年来光热界面水蒸发这种结合绿色的太阳能和丰富的海水资源的新型技术，由于具有高的光热转换效率、无污染等优点，在海水淡化和废水处理中得到了广泛的应用。然而，开发一种能够同时满足耐盐性、可循环性、低成本、适合各种复杂环境的光热蒸发体仍然是一个挑战。大自然中的树木是天然优良的水蒸发体，它具有非常丰富和发达的根须结构，可以深入地下百米甚至更远范围的土壤中吸收水分和溶于水分中的无机盐，然后进入茎导管，在毛细作用力下，能够高效快速的将水分传输到几米高的叶内导管，最后通过蒸腾作用，从树叶表面的气孔蒸发出去。植物还具有很好的环境耐受性，在酸性、碱性、含盐的土壤中都能实现良好的水蒸发。因此，受植物的启发，我们采用 3D 打印的方式制备出一体化仿生树碳纳米管基光热水蒸发体。其中碳纳米管基光吸收层作为外层，亲水的纤维素材料作为内层，整个光热蒸发体分为上部的光吸收蒸发层（仿生植物的树叶）和下部的水传输层（仿生植物的根须）。实验和理论计算证明了该仿生树蒸发体具有好的光吸收，优良的盐自清洁性能，可以在多种复杂环境如液液介质（淡水、盐水、染料废水等）和固液介质（湿泥、湿沙等）中提取水进行蒸发，且可重复循环使用，为解决全球水资源短缺，特别是偏远地区的水资源短缺和复杂环境下淡水资源的提取提供了可能性。

参考文献

- [1] Y. Hou, M. Wang, X. Chen, X. Hou, Nano Research 2021, 14, 2171.
- [2] W. He, L. Zhou, M. Wang, Y. Cao, X. Chen, X. Hou, Science Bulletin 2021, 66, 1472.
- [3] P. Cao, L. M. Zhao, J. Zhang, L. W. Zhang, P. Yuan, Y. Y. Zhang, Q. W. Li, ACS Applied Materials & Interfaces 2021, 13, 19109.

D18-P-04

A universal biocompatible coating for enhanced lubrication and bacterial inhibition

Di SUO*, Xin ZHAO

The Hong Kong Polytechnic University

Antimicrobial coatings that inhibit bacterial attachment and prevent biofilm formation are essential for many implanted medical devices. A variety of antibacterial strategies, such as repelling or killing bacteria, have been developed, but not yet been completely successful as approaches using a single antibacterial mechanism is less effective. Here, we develop a universal biocompatible coating for enhanced lubrication and bacterial inhibition. The coating is designed based on mussel-inspired surface-attachable dopamine bases and consist of lubricating zwitterionic polymers poly (2-methacryloxyethyl phosphorylcholine) (MPC) and a bacterial membrane destroyed anti-bacteria molecule poly (3-hydroxybutyric acid) (PHB). The coating boasts strong adhesion to surfaces of various materials (such as polydimethylsiloxane (PDMS)/ceramic/316L stainless steel (316L SS)); it is biocompatible, cell/platelet/bacteria repelling, significantly inhibiting bacteria growth. In summary, the self-adhesive biocompatible coating can effectively enhance lubrication and bacterial resistance performances and represents a universal strategy for surface functionalization of biomedical devices and implants.

D18-P-05

具有轴向 Mn-N₅ 位点和 2D d- π 共轭网络的锰基抗氧化酶激发生物催化剂用于干细胞保护

吴子鹤¹，李倩¹，程冲^{1,*}

1. 四川大学高分子科学与工程学院高分子材料工程国家重点实验室，成都 610065

E-mail: chong.cheng@scu.edu.cn (C. Cheng)

以干细胞移植为基础的再生医学的快速发展，为心脏功能修复、神经细胞再生、难治性骨缺损等严重组织损伤的治疗提供了光明的前景[1]。然而，在干细胞增殖过程中活性氧(reactive oxygen species, ROS)

的异常增加会导致细胞结构严重破坏,从而抑制干细胞的粘附和分化,最终限制了干细胞移植在临床治疗中的应用[2]。天然抗氧化酶,如人线粒体锰超氧化物歧化酶(Mn-SOD)[3],可以通过独特的三维几何结构和轴向配位组氨酸调节活性氧的吸附/解吸,并调节催化中心的多电子反应[4]。锰(Mn)-四吡咯大环作为 Mn-SOD 的重要组成部分,已被广泛研究并通过多种合成分子进行模拟。然而,这些锰基小分子通常缺乏清除 ROS 的能力,这可能是由于缺乏快速电子转移途径或轴向配位结构,对氧化还原性质和多电子反应的调节能力较差。因此,模仿 SOD 的 Mn-N 配位结构和三维几何形状可能为创造具有增强 ROS 清除性能的新型人工抗氧化酶提供新的灵感。本研究受锰基抗氧化酶配位结构的启发,合成了一种具有轴向 Mn-N5 位点和 2D d- π 共轭网络的新型锰基聚酞菁生物催化剂(Mn-PcBC),作为挽救干细胞命运的人工抗氧化酶。通过实验研究,表明该 Mn-PcBC 具有轴向配位 Mn-N5、强 π 共轭体系、电子导电性好、暴露金属中心密度高、化学稳定性高等优点。进一步通过理论计算证明, Mn-PcBC 不仅可以通过 2D d- π 共轭网络加速电子转移,还可以通过 Mn-N5 轴向配位调节活性氧清除过程中关键中间体的吸附能。由于基于聚酞菁的二维网络和轴向配位结构的结构优势, Mn-PcBC 显示出高效、多方面和强大的活性氧清除活性,包括 H₂O₂ 和 O₂^{•-},这超过了迄今为止报道的基于 Mn 的活性氧清除人工抗氧化酶。此外,我们发现 Mn-PcBC 可以通过保护成骨相关基因的转录,在含有 ROS 的微环境中对 hMSC 的存活率、细胞骨架组织、粘连形成和成骨分化提供足够的保护。因此,这种高效、多面、强效的人工抗氧化酶将为干细胞相关治疗和丰富的 ROS 介导疾病带来光明的前景。这项工作不仅提供了对轴向协调 Mn-N5 位点在 ROS 清除中的关键功能的重要见解,而且还提出了为干细胞保护创造高效人工抗氧化酶的新策略。

关键词: 锰基抗氧化酶; 共轭网络; Mn-N5; ROS; 干细胞

参考文献

- [1] ANDRZEJEWSKA A, DABROWSKA S, LUKOMSKA B, et al. Mesenchymal Stem Cells for Neurological Disorders [J]. 2021, 8(7): 2002944.
- [2] SHABAN S, EL-HUSSENY M W A, ABUSHOUK A I, et al. Effects of Antioxidant Supplements on the Survival and Differentiation of Stem Cells [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2017, 2017: 5032102.
- [3] BORGSTAHL G E, PARGE H E, HICKEY M J, et al. The structure of human mitochondrial manganese superoxide dismutase reveals a novel tetrameric interface of two 4-helix bundles [J]. Cell, 1992, 71(1): 107-18.
- [4] NAN F, JIA Q, XUE X, et al. Iron phthalocyanine-derived nanozyme as dual reactive oxygen species generation accelerator for photothermally enhanced tumor catalytic therapy [J]. Biomaterials, 2022, 284: 121495.

D18-P-06

丁二酸促进胶原矿化及其增强牙本质修复

邵长鸽*, 靳文静, 金晔丽, 潘海华

浙江大学

胶原的生物矿化是受非胶原蛋白和生物小分子的调控。这些分子在骨和牙形成中起到了关键作用,尤其是生物小分子丁二酸含量很高,但其作用还不明确。在本文中,我们研究发现丁二酸可以有效的促进胶原纤维和胶原凝胶的矿化,且相对矿化速率是对照组的 16 倍左右。此外,通过红外和等温吸附实验研究发现丁二酸和胶原之间相互作用主要是氢键,且能量在 4.35 kJ/mol。类似的结果,在脱矿的牙本质模型上也有表现。通过电子显微镜表征发现,丁二酸修饰以后的牙本质在 2 天以内实现了全矿化,大约 4 微米的厚度,而对照组修复需要超过 4 天。丁二酸促进胶原矿化的潜在的基质主要是丁二酸吸附在胶原纤维表面,提供更多的成核位点,降低了成核能垒,并在纤维内可以脱吸附,促进纤维内无定形磷酸钙的相变,从而加速了磷酸钙相变的速率,即促进了胶原纤维矿化。这些研究结果不仅加深了我们对于生物小分子在生物矿化中的起到的重要作用,同时也为牙本质修复提供了一个新的策略。

D18-P-07**基于手性调控的苯丙氨酸二肽-铜离子组装体的仿酶催化性能研究**

张弓*、张伟
苏州大学

近年来,通过手性调控策略来制备功能材料引起了研究人员的极大兴趣。然而,关于配体手性在金属-有机配位组装过程中的影响报道较少。因此,我们报告了基于 $A\beta$ 蛋白的核心片段苯丙氨酸二肽 (Phe-Phe, FF) 与金属铜离子 (Cu^{2+}) 自组装形成的金属有机组装体,其表现出手性控制的配位结构和物理化学特性。通过改变 FF 手性,我们制备出了具有不同形貌和超分子手性结构的金属二肽组装体。单晶结果表明 (L)-FF 与 Cu^{2+} 配位成五配位的交叉链结构,而 (L+D)-FF 与 Cu^{2+} 的外消旋体则结晶形成 (L)- Cu^{2+} -(D)- Cu^{2+} 交替四配位结构,具有更高的机械和催化性能。(L+D)-FF-Cu 的杨氏模量高达 34.36 GPa,是 (L)-FF-Cu 的 2.45 倍。此外,FF-Cu 组装体具有类天然漆酶催化活性中心的结构,实验结果表明它们都遵循酶动力学特征,并且在相同质量浓度下显示出比天然漆酶更高的催化活性。具体而言, (L+D)-FF-Cu 的计算催化效率 ($k_{\text{cat}}/K_{\text{M}}$) 是 (L)-FF-Cu 的 1.14 倍,并且 (L+D)-FF-Cu 的稳定性和可重复使用性优于 (L)-FF-Cu。总之,分子组装基元的手性调控是未来构建先进功能材料的有效策略之一。

D18-P-08**界面水控制的无定形碳酸钙在压力诱导下的结晶及致密化**

汪琦航*, 邹朝勇, 傅正义
武汉理工大学材料学院

Amorphous calcium carbonate (ACC) is metastable precursor in forming crystalline calcium carbonate biominerals. However, the exact role of water during the crystallization of ACC remains elusive. Here, a well-designed ACC is synthesized from crystalline calcium carbonate hexahydrate (ikaite), denoted as IACC. Comparing IACC and typical spherical ACC, we reveal that the crystallization pathways of ACC under heating or pressure are not dictated by the total amount of water in ACC as reported, but rather the interfacial water that is released from ACC bulk and adsorbed on the surface of the particles. Densely bulk vaterite can be obtained via pressured-induced transformation of IACC at room temperature, which is otherwise difficult to form using spherical ACC. These insights contribute to the understanding of the biological control of mineral formation via amorphous precursors and offer new opportunities to bioprocess inspired fabrication of strong bulk material at room temperature.

D18-P-09**仿企鹅羽毛及北极熊毛发中空大孔结构在黑体材料的热管控应用研究**

赵浩雨, 詹慧娟, 周杰, 俞书宏*
中国科学技术大学

南极企鹅羽毛和北极熊毛发均具有天然的微纳米大孔结构,使其热导率降低,有助于企鹅和北极熊在极寒地区维持体温。受此结构启发,我们先后设计了两种具有不同尺度的仿生结构隔热材料,并将其应用于界面光热水蒸发热管控功能开发中。其中,具有纳米级中空孔道的双功能碳气凝胶,不仅可以用作隔热层,有助于防止热量从表面散失,也可以作为光吸收层。空心碳纳米纤维网状结构能有效地抵抗热输运,使碳纳米管基气凝胶具有良好的隔热性能。此外,由于气凝胶的轻质和疏水特性,它可以自浮在水面上。此外,还通过密胺海绵的自模板工艺,设计了具有互联大孔结构的仿生 3D 桁架结构的黑体材料,其特征在于其多级孔道结构中,大孔在 100 微米级,具有高速的水运输能力,有利于水再生过程中

水蒸发。而类北极熊毛发结构的微米级微孔孔径接近于分子自由程，具有很好的隔热功效，有利于光热转化过程中的界面热管控，以实现高效的光热转化水蒸发。此外，所制备的两种仿生黑体材料还兼具抗结盐和耐候性。综上，受企鹅羽毛和北极熊毛发中空结构启发，我们宏量制备了多级孔道结构的高效界面光热转化水净化黑体材料，并用于盐水中的长期稳定的光热转换和高速率的水蒸发。

D18-P-10

磷酸钙纳米簇在修复骨质疏松骨中的研究

姚沙沙¹, 唐睿康^{*1,2}

1. 浙江大学医学院附属邵逸夫医院

2. 浙江大学化学系

骨和牙等硬组织是经过长时间演化而形成的一种有机-无机复合多级结构材料[1]。在正常骨中，HAP会沿着胶原的长轴方向生长，最终形成连续的胶原纤维内矿化，这种通过层层组装的方法得到的骨骼具有多级结构和强大的硬度及韧性。正常骨中有机物占 30%左右，无机物占 70%左右，当骨中缺少矿物后会引发骨质疏松症。由于缺乏 HAP 矿物，导致骨质疏松骨的机械性能降低，甚至会引发骨折等。骨质疏松症是世界上最普遍、发病率最高的疾病之一。骨微观结构的破坏是由于骨的吸收与骨的形成之间的平衡被打破，导致骨的形成能力小于吸收能力，从而破坏骨小梁，导致皮质骨变薄，这一系列变化导致骨的抗压能力下降而易于骨折。

材料与方法：配置 0.1 mol/L 的氯化钙和磷酸氢二钠溶液，0.3 g/mL 的聚丙烯酸溶液，以及浓度分别为 0.3 g/mL 和 0.15 g/mL 的聚丙烯酸和聚天冬氨酸混合溶液。聚丙烯酸和聚天冬氨酸混合溶液需要超声过夜才能完全溶解。超声过程中请注意水温不要过高，实验用蒸馏水须为双蒸水。氯化钙溶液，磷酸氢二钠溶液，聚丙烯酸溶液在使用之前用 0.22 微米的滤膜过滤。

结论：在实验过程中，我们将纳米簇直接注射入小鼠的胫骨平台中，四周，八周和十二周以后取出修复的小鼠骨来检测其修复性能。结果显示，该纳米簇可以有效的修复骨质疏松的小鼠骨，并表现出极好的机械性能。本实验采取注射的方法，不需要创建缺损区域，是更加有效和快捷的修复骨质疏松骨的方法。总结了纳米簇的制备过程和应用，总结该纳米簇对生物仿生矿化的启发作用，并为今后的科学研究提出了亟待解决的问题。

D18-P-11

酶促氧化对映体 DOPA 聚合制备高力学强度及稳定性薄膜

申雨禾, 苏荣欣, 齐崑, 王跃飞*

天津大学

作为自然界的基本属性之一，手性从分子到宏观层面都无处不在。对手性现象的研究不仅对催化、合成和分离等研究领域具有重要意义，而且对生命科学、医药科学和材料科学等其他科学领域也有重要的科学和实用价值。表面和界面的手性已经引起了越来越多的关注，L-3,4-二羟基苯丙氨酸（L-DOPA）是高黏附贻贝的核心序列，由 DOPA 介导的双叉氢键、与金属/金属氧化物的配位键或共价交联被认为是其产生湿粘性的主要原因。同时，DOPA 继承了来自酪氨酸的手性，其作为天然黑色素的氧化前体，在生命系统中发挥重要作用。然而，手性对其粘附性的影响还没有报道，DOPA 单体的手性对其聚合粘附的影响也仍不清楚。研究手性 DOPA 在界面上的粘附特性可以更好地解释贻贝在不同表面上的粘附机制，并为开发和设计新一代坚固的粘合剂和涂层材料提供理论指导。

在此，我们通过酶促氧化聚合研究了 DOPA 分子手性对组装材料性能的影响，应用不同的实验技术，如小角、广角 X 射线散射 (SAXS/WAXS)、单分子力谱和分子动力学 (MD) 模拟，我们证明了自组装机制和单一和混合系统的结构组织的差异，并通过表面等离子激元共振技术 (SPR)、原子力显微镜 (AFM)

等进一步表征了涂层的性质。结果显示，不同于单手性体系，对映体聚合显著改变了聚合程度和组装动力学，L+D-外消旋混合物的氧化产物具有更强的分子间力和更有序的片层堆叠排列，其氧化得到的涂层结晶度、热稳定性和力学性能都有显著提高。由于 poly (L+D-DOPA) 复合膜内部高度有序的层状堆积结构，在迄今为止报道的生物分子中具有最高的杨氏模量，其值高达 138.6 GPa。本研究通过控制单体手性，突出了手性在共价聚合和自组装中的重要性，为制造具有增强物化性质的仿生聚合物材料提供了新的简单途径。

D18-P-12

压力驱动无定形碳酸钙颗粒融合制备结构连续的块体材料

汪洁¹ 慕昭^{1,2} 孔康任¹ 刘昭明¹ 唐睿康*¹

1. 浙江大学

2. 中国人民解放军第四军医大学口腔医院

生物有机体能通过无定形前体的粒子-粒子融合产生具有连续结构和灵活形态的无机骨架。然而许多无机材料在从粉末固结成块体时，由于内部无法实现完全的颗粒融合而影响块体材料的性能。受龙鱼牙齿的形成中深海高压环境和无定形矿物的启发，我们通过无定形碳酸钙颗粒内部的结构水含量和外部压力的协同调控，利用动态水通道促进传质，从而实现颗粒融合。具体地，当一个碳酸钙分子对应 0.2-1.1 个水分子的时候，再施加 0.6-3.0 GPa 的压力，就能实现无定形碳酸钙颗粒在压力下的融合。这种方法构建的碳酸钙块状材料具有良好的光学透过性和机械性能，硬度为 2.739 GPa，弹性模量为 49.672 GPa，这些性能优于大多数的水泥基块体材料，甚至接近方解石单晶。这种策略克服了传统烧结传质不充分的缺点，为制备无机块体材料提供了新的方法，能帮助我们更好地认识并模仿生物矿化过程。

D18-P-13

仿生盲鳗的超分子智能响应 SLIPS 海洋防污涂层

佟哲名，胡建坤，詹晓力，张庆华*

浙江大学化学工程与生物工程学院

生物污损现象给海洋资源开发利用等诸多领域造成了严重影响，附着在器材或设备表面的污损生物改变了表面的诸多性质，造成表面性能的改变，造成经济损失甚至生命危险。广谱防污剂三丁基锡因其高致畸性，在 2008 年被禁用。因此制备环境友好的高效防污涂层材料对于我国“海洋强国”战略具有重要意义。润滑液注入多孔基材的超润滑表面 (Slippery liquid-infused porous surface, SLIPS) 具有动态的防污表面，在海洋防污领域具有广阔的应用前景。然而，润滑液的流失是限制 SLIPS 在实际环境中长期使用的主要原因。传统 SLIPS 涂层的润滑剂容易在水流等外界作用下流失，造成防污效果下降、寿命缩短。盲鳗受到捕食者的刺激 (机械、光等) 会立即分泌粘液，减少与捕食者之间的接触和摩擦，快速逃避掠食者的追捕。本文受盲鳗防御行为的启发，基于 α -环糊精(α -CD)和偶氮苯之间的超分子相互作用，制备了一种具有润滑模式响应切换和自修复特性的智能 SLIPS 防污涂层。 α -CD 和偶氮苯之间的主客体作用是一种典型的超分子作用力。偶氮苯具有顺反异构，并且能够可逆转化。由于顺式偶氮苯的空间位阻较大，反式偶氮与 α -CD 的结合常数是顺式的 2 个数量级。因此只有反式偶氮苯能插入 α -CD 空腔并牢固结合。偶氮苯顺反异构转换可以调节与 α -CD 的连接或分离。当受到可见光或加热刺激时，顺式偶氮苯可以转化为反式并与 α -CD 结合，导致聚合物链和聚合物体积微收缩，然后模拟盲鳗的防御行为，将储存的润滑剂挤出至表面。响应后表面渗出更多的润滑液，使 SLIPS 具有更好的表面润滑性和更高效的防污性能。该智能 SLIPS 可以通过调节表面润滑性来切换不同防污模式，以满足不同防污需求。当污损生物在白天或炎热季节生长旺盛时，涂层会渗出润滑剂并切换到“增强”防污模式。相反，涂层在夜间或寒冷季节基本停止润滑剂渗出，切换到“普通”防污模式，足以满足较低的防污需求。该机制减少不必要的润滑液浪费，

实现了润滑液按需响应释放，有效延长 SLIPS 使用寿命。该仿生盲鳗智能 SLIPS 低表面能海洋防污涂层具有润滑剂响应渗出、表面润滑模式切换、稳定性、自修复（91.73%）、自清洁和抗粘附（蛋白质、藻类、细菌和模拟藤壶）的优异性能。此外，涂层在实海（舟山）中于海生物生长旺季表现出了 180 天的优异防污效果，证明了其具有在浅海设备防污领域应用的潜力。

D18-P-14

原子级到微米级有序延伸的 PbS 量子点超晶格光电探测性能研究

刘霄*、王创垒、陈振浚
华南师范大学

本研究通过 PbS 量子点纳米晶自组装及退火处理诱导，构建了介晶量子点超晶格。与无序量子点薄膜和 FCC/BCC 紧密堆积量子点超晶格相比，介晶量子点超晶格取向对于电子离域和耦合有明显的改善，表现出优异的光电探测器性能。

首次构建 PbS 量子点介晶超晶格光电探测器，具有微米到原子级别的有序排列和择优生长方向。长程有序结构改善了量子点之间的取向和原子排列，增强了电子耦合，使红外光电探测器具有优越的光电特性和电荷传输能力。

关键字 量子点超晶格，介晶，光电探测器，晶体学取向

D18-P-15

胞外聚合物/MXene 复合膜反向电渗析产电性能

曹达啟*，唐凯，郝晓地
北京建筑大学

污水资源化已成为未来污水处理技术的必然，回收污水处理厂剩余污泥中高附加值的胞外聚合物（EPSs）已成为研究热点。研究利用 EPSs 作为天然高分子材料，复合二维金属碳化物和氮化物（MXene）成功构筑出高性能 EPS/MXene 复合膜。EPS/MXene 复合膜具有类似于 MXene 二维膜的层状离子通道，作为纳米流体膜，通过反向电渗析实验发现其具有优异的产电性能。复合膜具有更高的阳离子选择性，膜内阻低至 3.5 kΩ；模拟污水处理厂二级出水与海水混合实验得出，含有 10 wt% EPS 的 EPS/MXene 复合膜的输出功率密度可达 5.49 W/m²，为 MXene 膜的输出功率密度的 2 倍。研究亦针对多种污水处理厂剩余污泥及各种提取方法获得的 EPSs，探究了 EPS/MXene 复合膜的产电性能；进一步证实，污泥中回收的电荷性负的 EPS 可作为 MXene 纳米片之间的嵌层和联锁剂，以强化二维 MXene 膜的产电性能。此外，复合膜具有良好的生物兼容性和突出的水稳定性，并在 30 天内保持高离子导电性。本研究有望开启污水处理厂剩余污泥中回收 EPSs 的高附加值新应用；同时，EPS/MXene 复合膜不仅强化“蓝色”盐差能渗透产电，而且降低纳米流体膜构筑过程中二维材料的使用量。

D18-P-16

基于磷酸钙离子寡聚体制备超韧仿生层状复合材料

余亚东^{1,2}，刘昭明¹，唐睿康*¹

1. 浙江大学 化学系

2. 浙江大学杭州国际科创中心

仿生贝壳的层状有机-无机复合材料因其优异的机械性能而受到广泛的关注与研究。然而，在应力作用下，有机与无机相之间的界面缺陷往往导致材料的裂纹扩展和断裂失效。研究表明，天然骨骼比贝壳

拥有更高的弯曲韧性，是因为骨骼中小尺寸的无机建筑单元改善了有机和无机之间的相互作用，优化了材料的韧性。受上述生物结构的启发，在这里，我们将超小的磷酸钙离子寡聚体与聚乙烯醇和海藻酸钠有机网络整合，制备了一种新型超韧的层状纳米复合材料。基于有机与无机相之间的分级有序结构和强烈的分子相互作用，所得到的复合材料具有超高的弯曲应变（> 50%无断裂）和韧性（21.5~31.0 MJ m⁻³），超越了天然贝壳和目前报道的几乎所有合成的仿生贝壳层状复合材料。本研究为利用无机离子寡聚体制备具有超高弯曲韧性的有机-无机纳米复合材料提供了一条新的途径，所制备的超韧层状复合材料在韧性防护和吸能材料等领域具有重要的应用前景。

D18-P-17

基于超疏水基底的响应性凝胶神经元体系用于分子可视化传感、布尔逻辑计算和数据加密

李金泽，高中锋*

临沂大学

受生命中信息处理和逻辑运算的启发，研究人员已发展了多种分子系统用于信息安全。然而，在超浸润系统中，物质、能量和信息之间的协同编码仍然具有挑战性。在此，本研究提出了一种基于超疏水基底的响应性凝胶神经元体系，用于分子可视化传感、布尔逻辑计算和数据加密。将曲拉通 X-100 封装在明胶中制备响应性水凝胶，通过胰蛋白酶选择性分解明胶，释放曲拉通 X-100 以降低液滴表面张力。通过考察液滴在超疏水表面的接触角、滚动角和弹跳现象，可实现胰酶的可视化定量检测。响应性水凝胶可作为分子水平的人工凝胶神经元，实现物质（如超疏水表面、胰蛋白酶和亮抑酶肽）、能量（如液体表面张力和固体表面能）和信息（如液滴表面张力、接触角、滚动角和反弹）的相互作用。不同物质的输入可诱导能量发生改变，从而对输出信息进行布尔逻辑树构建与二进制编码。该体系可以进一步发展为分子级双密码隐写术，对液滴在超疏水表面的浸润行为进行编码和二次加密，以实现特定信息（包括迷宫逃生路线和经典名著语句）的隐藏。本研究通过对液滴进行信息编码，实现了可视化分子传感、布尔逻辑计算、以及数据加密应用，将有效促进仿生超浸润材料与信息领域的交叉研究。

D18-P-18

仿皮肤结构的高性能透明防腐涂层

雷洋、游波*

复旦大学

受皮肤角质层的屏障和保护功能的启发，我们仿照皮肤角质层的“砖-泥”（brick and mortar）结构，提出了一种磁场诱导组装策略制备高性能透明防腐涂层。我们用少量的水平排列的疏水氧化石墨烯片来模仿疏水的角质细胞，将其作为填料加入到环氧涂层中。其中的改性氧化石墨烯是通过原位改性方法合成的。该仿生纳米复合涂层（Bio-MFIC）在盐雾试验和浸泡试验中能够保持涂层完整，保护金属不受腐蚀。结果显示，Bio-MFIC-3（填料含量 0.75 wt%）在浸泡 28 天后，涂层阻值是纯环氧涂层阻值的 43 倍。改性氧化石墨烯的高长径比、疏水性和磁场诱导的仿皮肤结构共同作用下，腐蚀介质的扩散收到阻碍，Bio-MFIC 涂层的防腐性能得到了显著提升。

关键字 仿生涂层，防腐涂层，氧化石墨烯，皮肤角质层

D18-P-19

Nanobiology Dependent Therapeutic Convergence between Biocompatibility and Bioeffectiveness of Graphene Oxide Quantum Dot Scaffold for Immuno-inductive Angiogenesis and Nerve Regeneration

Zhiwen Yan*, Yun Qian, Cunyi Fan

Shanghai Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine

The understanding of nanomaterial biology determines material selection and scaffold fabrication in regenerative medicine. The translational application of advanced functional nanomaterials, like graphene and derivatives, requires an in-depth investigation on the sophisticated material-cell action network. To achieve the therapeutic convergence between biocompatibility and bioeffectiveness, herein, we screen a series of graphene derivatives and confirm the superiority of graphene oxide quantum dots (GOQDs). Thereby, we fabricate a GOQD functionalized nerve scaffold for peripheral nerve repair with electrospinning and freeze-drying technology. The behavioral, electrophysiological, and pathological analysis confirms that GOQDs promote nerve structural reconstruction and attenuate denervation-induced myopathy. Macrophages perceive the implanted materials and initiate a variety of biological processes. GOQDs activate the macrophage ERK/CERB/VEGF pathway both in vitro and in vivo, thereby contributing to intraneural vascularization. In addition, an enzyme-activated degradation route of GOQDs is explored and the implanted scaffolds trigger negligible scar formation and blood toxicity. Our findings demonstrate the ability of the GOQD, a biocompatible graphene derivative, to facilitate intraneural vascularization and regeneration of injured peripheral nerves through a macrophage intracellular signaling-mediated mechanism. This enlightens us to continuously explore the mechanisms behind the material nanobiology-dependent therapeutic convergence between biocompatibility and bioeffectiveness for clinical translation.

D18-P-20

受海参启发的遇水变硬智能聚合物凝胶

明小庆, 姚乐, 朱贺, 张祺, 朱世平*

香港中文大学 (深圳)

近年来, 具有可变机械性能的响应性聚合物材料因其在软机器人、人造肌肉、智能电子等领域中的应用潜力而得到快速发展。在已有的报道中, 响应性聚合物材料可以利用各种刺激来实现可切换的模量变化, 而水作为绿色可利用的环境资源, 具有储量广泛、无能源成本以及条件温和等特点, 在作为刺激源方面具有显著优势。然而, 传统的聚合物材料通常会由于水的塑化作用而表现出水致变软的现象, 极大地限制了其在高湿度或水系环境中的使用。因此, 开发具有遇水变硬的聚合物材料将有利于拓展水响应性聚合物材料的选择和应用, 但同时也极具挑战性。

自然界中, 海参等棘皮动物能够响应外部刺激而可逆地改变其真皮的硬度, 以抵御天敌或者规避危险。研究表明, 其真皮结构包含刚性胶原蛋白纤维和柔软基质, 在外部刺激下可以实现刚性相互作用的开-关调控, 从而实现真皮的软硬转变。受此启发, 我们设计了一种新型的聚合物凝胶材料, 该材料在相分离的基础上表现出显著且可逆的水致硬化现象, 这完全不同于因为水的增塑作用而导致软化的传统聚合物材料。这种材料在遇湿后的杨氏模量表现出很大的变化 (最高达 10^4 倍), 远大于玻璃化转变引起的变化, 与结晶-熔化过程相当。此外, 在可逆的软-硬转变过程中, 其体积几乎保持不变。我们系统研究了组分对模量变化的影响, 表征了水致硬化过程中的相分离机制, 提出并验证了水致硬化的通用方法, 最后将这种材料应用于湿度诱导的形状记忆。这项工作为开发水致硬化材料提供了一种有效的方法, 并将为水响应聚合物材料的潜在应用铺平道路。

D18-P-21

弱界面如何同时强韧化纳米纤维素材料

何泽洲*, 吴恒安

中国科学技术大学

生物结构材料因其复杂而精细的层级结构和界面, 表现出卓越的力学性能和多功能性。其中, 弱界

面与微结构协同工作，在多个尺度上调控着生物结构材料的非弹性变形和增韧机制，实现了材料独特的刚度、强度与韧性的组合，启发了高性能仿生纳米复合材料的发展。非共价界面作为一类弱界面，能在变形过程中动态地断裂和重构，始终保持载荷传递能力，并在界面上允许大的非弹性变形。因此，在材料中引入非共价界面能有效地调控增韧机制，平衡刚度、强度和韧性，从而有望解决纳米复合材料强韧性之间的矛盾。

本文系统讨论了非共价界面相互作用类型、空间分布、堆叠构型等参量的影响，通过界面本构关系明晰了非共价界面的共性特征；扩展了经典剪滞模型和 Frenkel-Kontorova 模型，建立了非共价界面多尺度力学模型，以描述多种非共价界面层状纳米复合材料非线性变形行为；给出了界面变形模式、关键特征尺寸、材料力学性能之间的内在关联，揭示了非共价界面层状纳米复合材料的一般性强韧化机制，为砖块-界面型复合材料的力学设计和优化提供理论指导。在非共价界面一般性力学框架下，以纳米纤维素材料为例，研究了通过调控界面湿度实现材料强度和韧性的同时优化设计。结合分子动力学模拟和剪滞模型，阐明了水分子调控界面性质的力学机理，揭示了界面力学行为增强材料宏观性能的力学机制。该理论可进一步拓展应用于石墨烯、芳纶纳米纤维和胶原纳米纤维等非共价界面主导的纳米材料，为高强度高韧纳米复合材料提供了一种新的界面设计策略。

D18-P-22

仿生纳流离子学用于类脑计算

虞乐建¹，侯旭^{1,2,3*}

1. 固体表面物理化学国家重点实验室，厦门大学化学化工学院

2. 福建能源材料科学与技术创新实验室（嘉庚创新实验室）

3. 厦门大学人工智能研究院

人脑内含有大约 10^{11} 个神经元和 10^{14} 个突触，它们集成在高度连接的神经网络中，拥有多种功能，如记忆和学习等。在神经网络中，神经元的电信号转化为化学信号，然后通过突触传递给接收神经元，这种信息传递对于协调复杂行为和认知功能至关重要。在这个过程中，离子是主要的信息载体，离子输运是神经系统中重要的信号转导途径。这种受脑启发的基于离子的脑计算为设计新型类脑计算架构提供了新的思路，并具有许多优势，例如低能耗、与脑机接口良好的生物相容性、无电磁干扰，这使其非常适用于人工神经元、脑机接口和复杂图像识别等应用。人工神经网络从人脑中感知处理的初期模型中汲取灵感，而神经形态计算则通过人工神经网络模拟人脑的效率、多功能性和灵活性。通过实施模仿人脑神经网络过程的算法，可以训练网络有效地解决各类问题。然而，要实现这些高级功能，对离子输运行为的控制是基础。

随着对纳米尺度离子输运行为的进一步理解，例如离子库仑阻塞、超快扩散性以及位阻效应，研究人员能够操纵和控制纳米流体力学，以探索新兴应用。这为通过调节离子输运行为来模拟类脑计算处理的人工纳米流体系统的构建提供了基础。这种基于离子的计算体系是基于界面相互作用和空间限域，可以看作是突破传统计算体系限制的一种有前景的方式。2021 年，侯旭教授团队提出“仿生纳流离子学”概念，引领剖析新兴的仿生纳流离子学在未来人工智能、脑机接口技术中的巨大潜能。其中，离子的独特载体特性赋予了纳米流体系统设计性和可调性，这些特性推动了构建高效类脑计算系统的人工纳米流体神经拟态器件的发展。深入理解这些内在机制在开展类脑神经形态计算系统的深入研究中起着至关重要的作用。因此，本文旨在更广泛地理解这一概念及其前景，并提供有关受脑启发的智能系统、最新研究进展以及新兴跨学科主题的背景信息。

参考文献：

[1] Xu Hou*, et al. *Science*, 2021, 373, 628-629.

[2] Xu Hou*, et al. *Nano Res.* 2023, <https://doi.org/10.1007/s12274-023-5900-y>.

D18-P-23

具有各向异性的仿壁虎粘合剂

石炜炜^{1,2,3}、程潇^{2,3}、程轲^{*2,3}

1. 昆山杜克大学

2. University of North Carolina at Chapel Hill

3. North Carolina State University

随着进化,生物具有先进功能和高性能,由从纳米到微米的固有多尺度结构组成。有些生物具有智能的粘附能力,复杂的粘合结构或成分,并且具有出色的粘合力。特别是,一些动物的附着结构具有由不同来源的突起的精细图案组成的刚毛或多毛系统。受这些生物装置固有结构的启发,研究人员致力于仿生设计和图案化表面的制造,以实现所需的卓越特征和属性。然而,它们中的大多数集中在具有垂直柱/纤维的图案化表面以促进各向同性粘附行为,或涉及复杂的光刻或电子束光刻方法的传统制造和工艺技术以实现各向异性粘附。如上所述,实现各向异性粘附行为的结构化表面的设计,以及模具的方便制备和制造工艺,需要更多的研究。微精密 3D 打印是适用于各种应用的最佳制造工艺,结合了超高分辨率、准确度和精密度,允许制造更复杂、精确和可复制的零件。本课题介绍了一种简单的方法来实现受壁虎启发粘合剂各向异性粘附行为,该粘合剂由通过 3D 打印技术制备不对称倾斜方向的微柱组成。与光滑平面的对照相比,结构化聚合物柱的粘附力强了 4 倍。各向异性的粘附行为也呈现在结构化的表面上,并且沿抓握方向比粘合剂上的释放方向强两倍,这归因于边缘处的不对称应力分布,以及顶部由力矩产生的应力,进一步应用有限元分析来演示倾斜柱子的应力分布和位移变化。这项工作为在实际应用中设计和制造具有各向异性粘附行为的粘合剂提供了见解。

关键字 仿生材料; 各向异性; 3D 打印; 微纳米结构

D18-P-24

P/N 复合有机半导体材料应用于气相 H₂O₂ 化敏传感器

周萌, 高楠, 谢孝文, 陈帅*

江西省柔性电子重点实验室, 江西科技师范大学药学院

化敏电阻传感器,特别是纳米结构半导体敏感材料的器件,因对气相分析物的检测具有高选择性、高灵敏度等特点,被应用于环境分析和安全监测等领域^[1]。其气敏性能取决于材料的成分、类型及形貌、光电等性质性能。P 型导电聚合物聚(3,4-乙撑二氧噻吩)(PEDOT)及聚(3,4-乙撑二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)具有稳定性和高电导率等优势,是当前该领域研究的重点之一^[2]。

双氧水(H₂O₂水溶液)应用广泛,其检测对生物健康和环境等领域很重要,但因湿气和氧化性并存,其气相(HPV)检测有困难。近年来,我们课题组基于 PEDOT、PEDOT:PSS 及其与草酸氧钛铵复合,构建薄膜传感器并实现对 HPV 的薄膜化敏检测^[3]。P-N 型异质结结构对半导体复合材料的光学吸收和响应具有促进作用,被应用于光学、化敏等传感材料的设计^[1,4]。茈二酰亚胺衍生物(PTCDIs)作为 N 型有机半导体材料,具有结构多和光学性能突出等优点,被应用于荧光和比色传感检测液相、气相分析物领域^[4-6]。我们课题组通过侧链结构设计,在 ITO 导电玻璃表面原位沉积构建 PTCDIs 薄膜,再用定量电化学聚合的方法在其交织网络中生长 PEDOT,制备具有 P-N 异质结互穿网络架构的 PTCDIs@PEDOT 复合薄膜^[7]。系统分析它们的性质性能,优选用于 HPV 检测的侧链为环己基的 PTCDIs@PEDOT 薄膜。它们具有表面抗湿润性,部分抵消湿气对 H₂O₂ 响应的干扰,保证材料在长期使用过程中的稳定性。复合薄膜对 HPV 实现低至 1.0 ppm 的检测限、5.76 min 的响应时间、5.53 min 的恢复时间。这些效果来自复合薄膜的稳定性、P/N 异质结结构效应、PTCDIs 纳米纤维支撑的多孔架构、PEDOT 的导电机制等方面。

参考文献:

- [1] J Mater Chem C, 2019, 7, 13709-13735.
[2] Chemosensors, 2021, 9(4), 79.
[3] 中国发明专利, 申请号: CN202010643611.3.
[4] Chem Rev, 2015, 115, 11967-11998.
[5] Chemosensors, 2021, 9(1), 1.
[6] 中国科学:化学, 2020, 50(1), 78-91.
[7] Mater Adv, 2022, 3, 1248-1253.

D18-P-25

天然生物陶瓷材料珍珠质中板片镶嵌方式的力学效应研究

梁思敏, 季洪梅, 李小武*

东北大学 材料科学与工程学院 材料物理与化学系 材料各向异性与织构教育部重点实验室

结构材料发展的目标之一是获得优异的力学性能, 尤其是将高强度、高韧性和轻量化完美地组合在一起。而经过数百万年的进化, 天然生物陶瓷材料珍珠质在实现微观结构与宏观性能的统一上已经具有了完美的策略。它通过建造跨越多个长度尺度的层级结构, 同时获得了远远优于其主要组成成分文石碳酸钙的强度与韧性。因此, 模仿珍珠质的层级结构将微/纳米材料组装为宏观人造材料, 能够为科学家和工程师制造高性能的结构材料提供新的思路。在微观尺度上, 珍珠质通过文石板片层与有机质层相间排列, 形成类似于“砖-水泥-砖”的结构。其中, 上下文石板片的交叠区域存在不同的镶嵌方式, 即平直型、燕尾型和反燕尾型结构, 这些不同的镶嵌结构对珍珠质的力学性能可能具有不同影响。但到目前为止, 研究者对珍珠质的研究与模仿主要集中在平直型板片结构, 对另外两种结构力学性能的研究仍十分有限。所以, 本工作通过对三种不同镶嵌结构的珍珠质进行三点弯曲和压缩实验, 并结合有限元模拟, 来探究不同镶嵌方式的力学效应, 以期确定更有益于珍珠质力学性能的镶嵌结构, 从而进一步提高仿珍珠质材料的性能。研究结果表明, 三点弯曲测试条件下, 反燕尾型结构的强度和断裂能最高, 平直型结构次之, 而燕尾型结构最低。根据对应的有限元模拟结果发现, 板片发生滑移后, 燕尾型结构中板片处的应力集中最为明显, 但平直型和反燕尾型结构中应力分布更为均匀。因而, 在燕尾型结构中更容易发生板片断裂现象, 而平直型或反燕尾型结构更容易发生板片拔出现象, 这与实验后观察到的断口形貌一致。此外, 压缩实验结果表明, 在垂直于片层方向加载条件下, 燕尾型结构的强度和断裂功密度要优于平直型结构, 进而优于反燕尾型结构; 在平行于片层方向加载条件下, 则是反燕尾型结构的强度最高, 平直型结构的抗断裂能力(断裂功密度)最好。观察压缩断口发现, 燕尾型和平直型结构垂直方向的样品主要沿加载方向发生劈裂, 而反燕尾型结构则发生剪切断裂。由于板片形状的不规则, 反燕尾型和燕尾型结构平行方向样品的断口表面出现较大范围的板片剥落现象。综上, 在不同应力状态下, 不同镶嵌结构的力学效应不同, 而为了获得最为杰出的性能, 在设计仿珍珠质材料时, 要充分考虑合成材料具体的应用条件与环境。因此, 本工作期望为设计与合成高性能的仿珍珠质材料提供有价值的参考, 如考虑板片镶嵌方式等。

D18-P-26

光响应仿生液体门控膜系统

沈毅刚¹, 侯旭^{*1,2}

1. 厦门大学化学化工学院

2. 厦门大学物理科学与技术学院

自然界中的生物经过漫长的进化历程展现出了精妙的结构和界面性质, 其独特的功能成为人类探索各种应用不断的灵感来源。受人体中肺泡结构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，具有对气体和液体的传输有着独特的功能，相比于传统膜材料具有抗污染和节能的优势。其中功能液体与固体膜之间的相互作用关系是设计稳定可靠液体门控系统的关键。我们利用一种光响应的功能液，研究开发了一种新型的光响应液体门控膜系统，在不同波长光的作用下，功能液体可以发生从液体到固体的转变。从理论和实验上讨论了不同波长光作用下光响应液体的性质，以及与固体膜的相互作用，以此作为理论依据，进一步讨论了该液体门控的系统界面设计以及稳定性，为实现可控气体和液体释放提供了一种简便的方法。此外，结合光响应、远程非接触方式，还展示了其在可控化学反应的应用。该液体门控膜对气体的可控释放，是实现智能化学反应、各种便携一体化工业设备的重要一步。

参考文献

[1] Xu Hou, et al. Nat. Rev. Mater. 2017, 2, 17016.

[2] Shuli Wang, Xu Hou, et al. Small 2020, 16, 1905318.

[3] Xu Hou, et al. Nat. Commun. 2018, 9, 733.

[4] Yigang Shen, et al. Lab Chip, 2020, 20, 3733-3743.

D18-P-27

载药可注射水凝胶与纤维复合支架用于缺血性脑卒中修复

杜文喆¹、陈彦熹²、薛佳佳^{*1}

1. 北京化工大学

2. 首都医科大学宣武医院

目的：由于大脑神经元的再生能力有限，缺血性脑卒中造成的神经与血管网络的损害最终会导致大脑永久性功能障碍。目前迫切需要能够支持神经与血管细胞生长、引导神经突起伸展以重塑受损脑组织的生物功能支架。**方法：**本研究基于聚己内酯与I型胶原蛋白复合纳米纤维(PCL/COL)、透明质酸基水凝胶(HyStem-HP)两种材料，结合莫诺昔药物，制备了载药可注射生物支架。其中，负载有莫诺昔的聚己内酯与I型胶原蛋白纺丝液通过静电纺丝制备形成有序排列结构的纳米级纤维膜，裁剪为短纤维后与莫诺昔分散在水凝胶中，以满足类似细胞外基质的纤维状结构和与大脑组织相匹配的模量需求。莫诺昔是从山茱萸中药材中提取出来的一种新型单体化合物，具有保护神经细胞和血管内皮细胞等多种功能，通过多重负载到可注射支架中赋予该支架独特的生物学特性。

结果：该支架具有较低的模量，能够实现莫诺昔药物在体外的长期释放以延长药物作用时间。在体外能够显著促进神经干细胞与人脐静脉内皮细胞的增殖、迁移以及神经元的轴突伸展。此外，注射到大鼠 ET-1 模型梗死腔后，研究表明该材料能够减小大鼠脑梗死面积。**结论：**本研究设计的载药可注射复合支架能够促进脑损伤的修复，有望为缺血性脑卒中后的脑组织修复支架的设计与开发提供参考。

关键字 缺血性脑卒中、水凝胶与纤维复合材料、莫诺昔

D18-P-28

氟磷灰石在限域空间内的仿生合成及添加剂对其结晶动力学的反作用

蔡梦，邹朝勇，傅正义*

武汉理工大学

釉质作为鲨鱼牙最坚硬的组织，是由氟磷灰石（FAP）晶体有序组装形成，因此具有优异的机械性能。然而，由于 FAP 晶体是在生物限域微环境下生成，因此关于它的结晶过程还不是很清楚。在本工作中，选取具有圆柱形孔道的聚碳酸酯刻蚀膜来模拟限域空间，通过双扩散法得到仿生 FAP 纳米棒。聚碳酸酯刻蚀膜可以被完全溶解，从而可以在不受影响的情况下收集孔道内部形成的纳米棒。我们发现，首先由无定形磷酸钙（ACP）纳米球堆积形成圆柱形的纳米棒，随后纳米棒通过固相转变机制转化为结晶态。

在此过程中, 相邻的具有不同取向的结晶域将融合形成沿[002]方向取向生长的大的晶粒。同时, 我们发现对于添加剂 Mg^{2+} , Sr^{2+} 和聚丙烯酸钠 (PAAs) 而言, 较低的添加剂浓度会促使结晶转变速率加快, 而较高的添加剂浓度会延缓结晶进程。总的来说, 这些关于仿生 FAP 纳米棒结晶的新的发现会加深我们对生物材料形成过程的理解, 从而为快速合成具有优异性能的仿生材料提供启示。

D18-P-29

仿生光响应液体门控膜

余诗洁¹, 张荣荣¹, 侯旭^{*1,2,3}

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
2. 厦门大学物理科学与技术学院
3. 福建省能源材料科学与技术创新实验室 (IKKEM)

在自然界中, 许多生物体可以通过调节自身的生命活动来适应外界的环境变化, 从而维持正常的生存。例如, 植物可以通过叶片上的气孔与大气之间进行气体交换。在外部刺激下, 气体交换率可以通过打开和关闭气孔来调节, 这对植物的存活起着至关重要的作用。在可见光照射下, 气孔打开与周围环境进行气体交换; 在强紫外光照射下, 植物的蒸腾作用增强, 气孔会闭合来防止水分进一步流失。受植物叶片气孔自我保护行为的启发, 我们利用含偶氮苯基团的表面活性剂溶液浸润的多孔尼龙膜, 构筑一种仿生光响应液体门控膜。由于偶氮苯基表面活性剂在可见光-紫外光照诱导下会发生顺反异构导致溶液的表面张力发生改变, 因此通过改变光照来可逆的调节气体的临界跨膜压强, 从而实现液体门控膜的在可见光下打开和在紫外光照下闭合的状态。仿生光响应液体门控膜能够实现智能气体输送, 并且它在紫外光照射下的能够自发闭合行为对一些需要在极端恶劣条件下启动自我保护行为的智能材料提供了新的设计策略, 扩大了在天然气输送、多相分离、石油开采等生物启发工程材料工业领域的应用。

参考文献

- [1] Zhang, R.; Lei, J.; Xu, J.; Fu, H.; Jing, Y.; Chen, B.; Hou, X. **Biomimetics**, **2022**, 7(2): 47.
- [2] Yu, S.; Pan, L.; Zhang, Y.; Chen, X.; Hou, X. **Pure Appl. Chem.**, **2021**, 93(12):1353-1370.
- [3] Hou, X. **Natl. Sci. Rev.**, **2020**, 7: 9-11.
- [4] Hou, X. **Adv. Mater.**, **2016**, 28: 7049-7064.
- [5] Hou, X.; Hu, Y.; Grinthal, A.; Khan, M.; Aizenberg, J. **Nature**, **2015**, 519 (7541): 70-73.

D18-P-30

仿生功能液体的 PDMS 海绵医用导管的制备及其抗菌抗炎抗凝血的研究

吴锋*

徐州工程学院

医用导管在药物输送和体外循环中得到了广泛的运用, 长期使用会导致细菌感染与凝血等症状, 对患者健康构成重大威胁。功能液体注入多孔表面由于其优异的滑移性和抗粘附性成为构建医用导管的理想材料, 然而, 在医用导管内构建多孔结构仍具挑战性。基于此, 结合中心圆柱体模具和氯化钠颗粒模板技术制备了 PDMS 海绵的多孔导管, 并结合亲和性设计构建了仿生功能液体的 PDMS 海绵导管。多孔结构可储存稳定的功能性液体, 不仅具有抗菌性、较少的巨噬细胞粘附、轻微的炎症反应, 而且能够抵抗血小板粘附和激活, 即使在高剪切下也能显著减少血栓形成, 具有重要的潜在临床应用价值。

D18-P-31

磁控“玫瑰花瓣高粘效应”与“猪笼草超滑效应”润湿性可逆转换表面仿生设计

窦海旭*

吉林大学

微液滴操纵在水收集、数字微流体、微化学反应和生物医学检测等领域具有重要研究价值。受自然生物的启发,当前已经开发出了众多超润湿性功能表面。其中比较具有代表性的有仿玫瑰花瓣高粘表面、仿猪笼草超滑表面,但是这些单一润湿性表面无法实现动态润湿性转换,这严重制约了其在微液滴操纵领域的发展,阻碍了该领域功能性产品的开发和应用。如何设计并制备一种兼具玫瑰花瓣效应和猪笼草效应的表面,并且实现两者润湿模式之间的高效转换将有助于解决这一问题。本工作以玫瑰花瓣和猪笼草为仿生原型,巧妙借助磁响应多孔海绵能够高效控制润滑油释放与回收的特性,设计并制备出了磁控“玫瑰花瓣高粘效应”与“猪笼草超滑效应”润湿性可逆转换表面,提供了一种对液滴钉扎与滑动状态的快速可逆转变以及液滴滑动路径灵活操纵的新方法,为实现液滴运动的智能控制提供了新的途径。

D18-P-32

有机-无机复合的超韧仿生水凝胶

桑艳华,余亚东,刘昭明,唐睿康*

浙江大学化学系

受无机寡聚体及其聚合的启发,我们开发了一种非均相无机聚合策略,通过诱导磷酸钙寡聚体(CPO)与聚乙烯醇(PVA)分子链网络的聚合,可用于制备仿肌肉的复合水凝胶。在这个过程中,CPO单元在海藻酸钠(SA)的“协助”下与PVA分子结合,然后沿着有机链逐渐聚合,形成直径为~1 nm的超细羟基磷灰石纳米线。由于有机相和无机相可以在非均相聚合中很好地结合,具有分级结构的水凝胶可以表现出超韧的力学性能,强度为~17.84 MPa,断裂能为~8.97 kJ/m²,这个性能超过了天然肌肉和大多数的合成水凝胶。此外,在受损的水凝胶部位加入CPO、PVA和SA的前驱液,可以诱导原位再聚合,有很好的修复效果。复合水凝胶在水环境下表现出类似肌肉的旋转运动,可以进一步发展为水驱动的仿生马达。

仅发表

D18-PO001

受生物启发聚氨酯弹性体多结构的响应摩擦调控

白常成、王晓龙*

中国科学院兰州化学物理研究所

摩擦力的改善对于提高握力至关重要,这种摩擦是平衡物体在干燥和潮湿条件下的滑动所必需的。如今,由于握力差或摩擦力不足而导致的滑倒的许多现实问题仍未得到解决。例如,握力不足会增加道路交通中车轮打滑引起的事故风险。由于体育活动中抓地力差,受伤率很高。手术器械在医疗领域的腹腔镜手术中会引起软组织损伤。这些事故通常会导致严重伤害甚至死亡。据报道,表面上的图案设计对于确定摩擦行为至关重要。随着仿生学的进展,猎豹的不可伸缩爪子可以在追逐猎物时快速改变方向。树蛙可以从树枝上跳下树枝而不会掉落等。受这些生物启发,仿生结构有望通过干燥和潮湿条件下的边缘效应的优势来改善动态摩擦。具有良好摩擦性能的弹性仿生结构,在工程中具有应用的吸引力。精心选择结构和弹性体材料特性,这有助于提高刚度和耐用性,并在静态和动态条件下承受最大力。然而,通过混合设计和形状制造技术的摩擦调谐机制仍然具有挑战性。在此,通过利用3D打印技术开发了一种可调控摩擦的聚氨酯弹性体仿生结构,灵感来自于自然界中的爪子、脚垫。研究不同混合结构在干湿条件下的摩擦调制,包括不同的结构布置、力学性能和数值模拟。通过对强边缘边界和自发液体分裂效应的评估,发现最优设计的结构,在湿表面上具有很强的摩擦特性,将其应用在工程中。

关键字 仿生结构;摩擦调控;3D打印;聚氨酯弹性体

D18-PO002

静电纺丝与生物大分子密度梯度相结合的三管道仿生神经导管的构筑及应用

秦俊杰¹、金冰慧²、薛佳佳^{*1}

1. 北京化工大学

2. 温州医科大学

由运动和感觉功能障碍而导致的周围神经损伤是一种严重的致残性疾病，给患者的家庭和社会带来巨大的经济损失。基于神经自体移植的临床治疗效果非常有限，神经导管是目前公认的最有希望替代神经自体移植的治疗方法。本文构建了一种基于静电纺丝纤维的三管道神经引导导管，选用聚己内酯与明胶的共混物为材料基体，用以导管的亲水性与生物相容性。此外，三管道仿生结构的设计、单轴取向的拓扑结构、胶原蛋白-生长因子核壳颗粒的缓释及梯度沉积为周围神经再生提供地形线索和生化线索，不仅能够促进轴突的再生和伸展，还可以避免轴突紊乱生长导致功能性恢复不足的问题。在体外试验中已经证明，纤维的取向结构与生长因子梯度沉积结构能够促进雪旺细胞的增殖和定向迁移，还可以促进 PC12 细胞和 DRG 中轴突的再生与定向伸展。在体内实验中，分别通过第 6、12 周的脚步印记、免疫组织化学染色、腓肠肌湿重比和腓肠肌肌纤维的横截面积等，证明了三管道仿生结构的设计具有促进轴突伸展、髓鞘再生、神经再支配和功能恢复的作用。

关键字 静电纺丝，同轴静电喷雾，周围神经损伤，梯度支架，组织工程

D18-PO003

多肽自组装纤维通过羟基磷灰石定向结晶为类骨材料

唐震航、邵长鹤*

浙江大学医学院附属口腔医院，浙江省口腔生物医学研究重点实验室

羟基磷灰石定向结晶的调控对制备结构有序的类骨复合材料至关重要。然而，人工合成的生物聚合物支架难以制备这种类型的复合材料。受 I 型胶原分子结构的启发，设计多肽自组装纤维支架-(Pro-Hyp-Gly)10(POG10)。类似于 I 型胶原纤维内矿化，多肽自组装纤维可通过羟基磷灰石晶体定向矿化为类骨材料。然而，与 I 型胶原纤维不同的是，POG10 纤维不含间隙。分子模拟计算结果表明，除了空间限域外，POG10 产生的分子场亦可限制羟基磷灰石的取向，这拓宽了此领域对物理限制的认知，并为人工合成生物聚合物支架的设计奠定基础。

关键字 类胶原多肽，羟基磷灰石，自组装，类骨材料，定向结晶

D18-PO004

光子晶体弹性体动态调控荧光

陈晓东、张连斌*

华中科技大学

荧光技术已广泛运用于发光二极管，现代传感技术，生物成像和光学器件中。对于荧光发色团光致发光的调控已经进行了大量研究，主要利用金属等离子体，光子晶体和两者混合结构。光子晶体作为一种新型的人工光学材料，具有结构简单，成本低廉等优点，其周期性的结构排列所产生的光子带隙可以通过降低光的群速度并对光态局部密度重新分布，从而达到对特定波长的光传播进行精确调控。目前，利用光子晶体结构调控荧光发色团的光致发光的工作主要是基于光子晶体的光子带隙与荧光峰的匹配程度，纳米粒子的多重散射和光子晶体表面积较大从而降低荧光发色团的聚集诱导淬灭效应，光子带隙的调控效果占主导地位。然而，在这些研究中，由于光子带隙在光子晶体结构制备过程中便以固定，严重影响了对于不同荧光发色团的调控效果，从而限制了实际应用。因此，基于现有研究存在的问题，在本工作中我们采用具有力致变色能力的光子晶体弹性体作为基底材料，研究了对分别位于结构表面和结构内部的不同荧光发色团光致发光的调控效果。实验结果表明，荧光发色团位于光子晶体弹性体结构表面

时，在拉伸过程中当光子带隙与荧光峰匹配时，可以观察到 1.8 倍的荧光增强效果；荧光发色团位于光子晶体弹性体结构内部时，在拉伸过程中当光子带隙与荧光峰匹配，可以观察到 40% 的荧光抑制效果。由于光子晶体弹性体光子带隙的变化范围覆盖了大部分可见光区，对不同类型荧光发色团均有调控效果，显著扩展了光子晶体调控荧光的实际应用。

关键字 光子晶体弹性体 调控荧光 防伪

D18-PO005

具有光电协同信号的可视化离子皮肤

吕全乾、张连斌*

华中科技大学

受可变色生物（例如变色龙、墨鱼、叶尾壁虎和比目鱼）皮肤组织的启发，我们通过光子弹性体和离子液体，1-乙基-3-甲基咪唑双三氟甲磺酰亚胺盐（[EMIm][TFSI]）的氢键相互作用制备了一种应变下具有光学和电学信号协同输出的单模块集成光子晶体离子凝胶。通过控制交联度，光子晶体离子凝胶可以对微小形变展现出高灵敏度响应，输出清晰直观的视觉颜色变化以及可辨识电信号，每百分之一应变下色彩灵敏度为~1.76 nm，电阻应变系数为 1。由于采用了稳定的光子弹性体和离子液体，光子晶体离子凝胶在恶劣和复杂的环境条件下，高/低温（-30℃至 100℃），干/湿空气和高真空，表现出良好的性能。此研究为开发具有协同光电信号输出的柔性交互式设备，稳定，多功能的离子皮肤传感器提供了一种新策略。

关键字 仿生，离子皮肤，光子晶体，交互式电子；传感

D18-PO006

基于仿生特殊浸润性材料的微流控系统

王树立¹、侯旭*²

1. 厦门大学电子科学与技术学院

2. 厦门大学化学化工学院

研究微通道中流体的流动行为，发展相应的微流体驱动与控制技术，对实现微流控器件各种功能和应用具有重要意义[1]。微通道中流体流动行为受流体与微通道内表面之间界面作用的影响[2]。因此，通道表面设计对微流体行为的调控起到非常重要的作用。受自然界中特殊浸润性材料的启发，研究人员通过控制表面化学和微纳结构，构建了多种仿生特殊浸润材料，为微流体控制提供了新的思路[3]。受各向异性浸润性水稻叶的启发，我们制备了仿生各向异性润湿表面材料，以仿生表面材料作为微通道表面之一，实现了微尺度流体行为控制[4,5]。最近，研究人员也报道了利用液体作为动态结构材料来设计微孔道内表面，进一步调控微尺度流体的流动行为[6,7]。受胃粘膜屏障机制的启发，我们设计了一种仿生智能微流控系统，其具有外部响应性单元和内部有微通道的多孔膜材料组成，该系统可以通过外部温度响应单元的相转变调控内部微通道内的流体输运行为，并通过动态功能液体层为微流控系统提供了优异的抗污染和抗溶胀性能。

[1] Xu Hou, et al. *Nat. Rev. Mater.* 2017, 2, 17016.

[2] Shuli Wang, Xu Hou, et al. *Small* 2020, 16, 1905318.

[3] Shuli Wang, Xu Hou, et al. *Chin. Chem. Lett.* 2021, DOI: 10.1016/j.cclet.2021.11.095.

[4] Shuli Wang, Junhu Zhang, Bai Yang, et al. *Langmuir* 2015, 31, 4032.

[5] Shuli Wang, Junhu Zhang, Bai Yang, et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2016, 8, 13094.

[6] Xu Hou, et al. *Nat. Commun.* 2018, 9, 733.

[7] Shuli Wang, Xu Hou, et al. *Acc. Mater. Res.* 2021, 2, 407.

关键字 仿生材料、浸润性、微流控、流体控制