



中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025
福建 厦门

D48-软物质
D48-Soft Matter

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D48-软物质

分会主席：吴晨旭、叶方富、帅建伟、游智鸿、林友辉

Chiral Active Matter

张何朋*

上海交通大学

Active matter is a class of out-of-equilibrium systems composed of self-driven individuals, which are widely found across scales from the macroscopic to the microscopic. Typical examples include animal groups, cell tissues, micro-nano machines, and molecular motors. The individual components of these systems break detailed balance by consuming locally stored free energy to achieve self-propelled motion, and through interactions, they exhibit a rich variety of collective behaviors. In many active matter systems, the structure or motion of individuals exhibits chirality (i.e., mirror asymmetry), a feature that further extends the dynamic characteristics of active matter, enhancing the complexity of both individual and collective behaviors. This has thus attracted significant research interest. This talk will focus on a series of works from our research group on chiral active matter, including disordered hyperuniform states in chiral algal systems, chiral boundary flows in bacterial systems, and chiral emergence phenomena in non-reciprocal robotic systems. We reveal the out-of-equilibrium characteristics of these chiral dynamic phenomena from both theoretical and experimental perspectives, while also exploring the potential impacts and practical applications of chiral active matter in fields such as biology, mathematical modeling, and engineering.

8095

生命小系统蛋白质非平衡动力学的单分子研究

陆颖*

中国科学院物理研究所

本报告介绍我们在单分子水平上研究生物小体系中蛋白质非平衡态动力学的最新进展。我们的工作聚焦于理解蛋白质结构的精确动力学行为和时序演化，这些过程在生物功能中扮演着至关重要的角色。我们研究了几个关键的蛋白质系统：首先，是神经系统中的 α -突触核蛋白聚集行为，这种现象与帕金森病相关。利用单分子技术，我们揭示了该蛋白如何以自我限制性方式与细胞膜相互作用，其中蛋白质聚集行为受到蛋白质-膜相互作用和蛋白质-蛋白质相互作用的双重调控。其次，我们探索了 DNA 修复酶连接酶中 ATP 驱动的构象变化。通过时间分辨单分子实验和电子显微技术，我们揭示了连接酶存在多个平行的反应途径，使其能够高效地修复 DNA，并适应各种 DNA 底物构型。最后，我们研究了单链 DNA 结合蛋白表面转变的离子调控作用，展示了盐浓度如何通过改变氢键网络来影响蛋白质与 DNA 的结合。我们的发现为理解生命小系统的非平衡态动力学提供了新的见解，深化了我们对驱动基本生命过程的物理机制的认识。

8852

惯性铁磁颗粒的集群相分离

彭毅*

中国科学院物理研究所

活性个体组成的集群会涌现出有趣的集体行为。本研究采用由运动行为可调的毫米级铁磁滚珠组成的模型系统，研究了具有显著惯性的宏观粒子的集体运动。在该系统中，我们观察到了一阶集群相分离，其中均匀的集群在各向同性的气体相中传播。集群相和共存的气体相之间表现出独特的粒子交换动力学，并维持着不同的有效温度，这在平衡系统中是无法实现的。通过结合实验、基于粒子的模拟和唯象理论，我们证明了惯性滚珠之间的非弹性碰撞导致了高密度和极性运动之间的正反馈，从而引发了集群相分离。我们的研究揭示了一种新型的惯性活性物质集体运动模式，具有潜在的应用前景。

A Journey Toward Designing AI-Facilitated Intelligent Active Particles

Lailai Zhu*

Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore

In this talk, I will present our group's recent progress in developing AI-facilitated swimming active particles in viscous fluids.

5960

粘弹性溶液中的微纳马达集群是更为有序还是更混乱？

祁楷*

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

在跨越生物群体（鸟群、菌落）至亚细胞结构（细胞器运输）的多尺度系统中，活性粒子集体运动普遍存在。微生物所处的复杂流体环境通常由高分子溶液或胶体体系构成，这类复杂流体具有粘弹性，其弹性效应显著影响微生物动力学行为。现有研究聚焦于单粒子在粘弹性流体中的推进机制，而对聚合物动态形变调控集体游泳行为的机理仍存在认知缺口。该研究通过格子玻尔兹曼流体动力学模拟，系统探究了粘弹性介质中 squirmers 群体的协同演化规律。基于极化强度的定量分析表明：当马达体积分数时，聚合物会显著增强体系的有序性——中性泳体极化度达无聚合物体系的 26 倍，拉动体提升 5 倍。通过建立包含团簇分布、回转半径及结构各向异性参数的多尺度表征体系，该研究首次揭示微纳马达-聚合物的协同反馈机制：微纳马达运动诱导聚合物拉伸形变，使聚合物链沿游泳方向定向排列，该形变反作用于马达流场并强化马达取向一致性，形成自增强的极化放大效应。为了定量阐明这一机制，我们创新性地引入表征马达运动与聚合物形变耦合强度的对齐参数，从而建立了活性粒子与复杂流体相互作用的定量表征框架。本研究为理解活性物质在复杂流体环境中的集体运动提供了理论基础，并为利用聚合物介导的流体动力学相互作用调控活性系统提供了新策略。

5801

稳定键及其在非晶体中的作用

徐宁*

中国科学技术大学

尽管非晶体中的每根键（即粒子间相互作用）对于维持粒子上的力平衡都是必要的，但并非所有键都对非晶体的力学稳定性至关重要。我们将那些移除后会导致力学失稳的键定义为“稳定键”，并发现它们在表征非晶体的临界稳定性和结构异质性方面发挥着重要作用。以无摩擦粒子的堆积为例，我们观察到在堵塞转变（jamming transition）以上，稳定键继承了来自 isostaticity 的临界稳定性特征。虽然所有键的弱力分布表现出强烈的压强依赖性，但稳定键的弱力分布则一直与理论值保持一致，直到达到一个转变点，此时稳定键的数量达到最小值。这个转变点标志着稳定键和临界稳定性的本质发生了转变，从以 isostaticity 为主导转变为以应力为主导。此外，稳定键在空间上与之前定义的软点（soft spots）相关联，这表明它们可能有效地表征了非晶体的结构异质性。

聚乙烯醇缩丁醛胶片形变和破坏机理

崔昆朋*

中国科学技术大学

聚乙烯醇缩丁醛（PVB）中间膜作为夹胶玻璃的核心部件之一，以其优异的抗冲击以及粘接性能被广泛应用于汽车、建筑、光伏等领域。PVB 中间膜作为一类高技术壁垒产品，长期被国外所垄断，国内产品性能（如低温抗冲击性）与国外差距明显。材料的结构决定性能，目前 PVB 的分子结构已经为大家所熟知，但对于其介观的亚微米尺度结构，特别是服役条件下的结构及结构演化仍不明确。针对这一问题，本论文利用上海光源国内首条超小角 X 射线散射（USAXS）光束线 — BL10U，在亚微米尺度下系统研究了（增塑）PVB 中的拉伸诱导形变和破坏机理。[1, 2]

参考文献:

[1] Changzhu Lv, Hang Guo, Shengyao Feng, Qi Yan, Chunlei Xu, Wancheng Yu, Liangbin Li, Kunpeng Cui*. Deformation Mechanism of Amorphous Plasticized Poly(vinyl butyral). *Macromolecules*, 2023 56 (7), 2663-2674

[2] Erjie Yang, Rongyao Ji, Jibin Miao, Qi Yan, Liangbin Li, Hang Guo*, Kunpeng Cui*, Deformation and Fracture Behaviors of Tough Plasticized Poly(vinyl butyral) across Broad Temperature and Strain Rate Ranges. *Macromolecules* 2024, 57, 16, 8123 - 8133

Phase separation mechanisms of amyloid proteins and material properties of their resulting condensates

Guanghong Wei*

Fudan University

5774

“生物凝胶”的力学和动力学理论

徐新鹏*

广东以色列理工学院

动物组织通常由嵌入细胞外基质 (ECM) 中的细胞组成, ECM 是一种复杂的纤维生物聚合物网络。特别地, 肝脏、脑和脂肪等软组织通常随着剪切或拉伸应变的增加而软化, 但在单轴压缩下它们会强烈变硬。相比之下, 无细胞体外重组的生物聚合物网络通常在施加的单轴压缩下软化。最近, 人们提出了几种微观机制来解释动物组织的“压缩-硬化”现象。然而, 动物活体组织的非线性涌现弹性的许多方面尚未完全了解。在本次报告中, 我将介绍活体组织的一个连续弹性理论, 其中活细胞“主动收缩”并表现出“力学稳态活性”。我将对动物活体组织非线性弹性性质的各个方面给出一些有趣的预测, 并将讨论与最近的流变学实验的联系。

1078

柔性抗冲击弹性体的设计与应用研究

兀琪*^{1,2}、吴锦荣^{1,2}

1. 四川大学高分子科学与工程学院

2. 先进高分子材料全国重点实验室 (四川大学)

针对日益复杂的冲击环境, 抗冲击材料逐渐向轻质化、柔性化与高抗冲击化等综合方向发展, 因此设计并开发新型柔性抗冲击弹性体体系显得尤为重要。在传统聚硼硅氧烷的基础上, 我们将联硼结构引入到硅氧主链上, 设计了剪切硬化性能更显著且抗冲击性能更优异的聚联硼硅氧烷体系。借助硼氧动态作用, 我们进一步构筑了具有剪切硬化效应的抗冲击牙套、抗冲击粘接剂与柔性抗冲击内屏, 提供了一种柔性抗冲击弹性体的设计与应用策略。

8247

Bacterial swimming motility near solid surfaces

Junhua Yuan*

University of Science and Technology of China

In natural environments, solid surfaces present both opportunities and challenges for bacteria. On one hand, they serve as platforms for biofilm formation, crucial for bacterial colonization and resilience in harsh conditions. On the other hand, surfaces can entrap bacteria for extended periods and force them to swim along circular trajectories, constraining their environmental exploration compared to the freedom they experience in the bulk liquid. Here, through systematic single-cell behavioral measurements, phenomenological modeling, and theoretical analysis, we reveal how bacteria strategically navigate these factors. We observe that bacterial surface residence time decreases sharply with increasing tumble bias from zero, transitioning to a plateau at the mean tumble bias of wild-type *Escherichia coli* (~ 0.25). Furthermore, we find that bacterial surface diffusivity peaks near this mean tumble bias. Considering the phenotypic variation in bacterial tumble bias, which is primarily induced by noise in gene expression, this reflects a strategy for bacterial offspring persistence: In the absence of stimulus cues, some bacteria swiftly escape

from the nearby surface in case it lacks nutrients, while others, with longer surface residence times, explore this two-dimensional environment most efficiently to find potential livable sites.

6383

Thermal and active fluctuations of a compressible bilayer vesicle

Shigeyuki Komura*

Wenzhou Institute, University of Chinese Academy of Sciences

We discuss thermal and active fluctuations of a compressible bilayer vesicle by using the results of hydrodynamic theory for vesicles. Coupled Langevin equations for the membrane deformation and the density fields are employed to calculate the power spectral density matrix of membrane fluctuations. Thermal contribution is obtained by means of the fluctuation dissipation theorem, whereas active contribution is calculated from exponentially decaying time correlation functions of active random forces. We obtain the total power spectral density as a sum of thermal and active contributions. An apparent response function is further calculated in order to compare with the recent microrheology experiment on red blood cells. An enhanced response is predicted in the low-frequency regime for non-thermal active fluctuations.

8564

Fluidization and anomalous density fluctuations in 2D Voronoi cell tissues with pulsating activity

李诸钦、雷群利*、马余强

南京大学

Cells not only can be motile by crawling but are also capable of non-motility active motions like periodic contraction or pulsation. In this work, based on a Voronoi cell model, we show how this non-motility activity affects the structure, dynamic and density fluctuations of cellular monolayers. Our model shows that random cell pulsation fluidizes solid epithelial tissues into a hyperuniform fluid state, while pulsation synchronization inhibits the fluidity and causes a reverse solidification. Our results indicate this solidification is a BKT-type transition, characterized by strong density/dynamic heterogeneity arising from the annihilation of topological defects in the pulsating phase space. The magnitude and length scale of density heterogeneity diverge with the pulsating period, resulting in an opposite giant density fluctuation or anti-hyperuniformity. We propose a fluctuating hydrodynamic theory that can unify the two opposite anomalous fluctuation phenomena. Our findings can help to understand recent experimental observations in MDCK monolayer.

Reference:

[1]. Z.-Q. Li, Q.-L. Lei, Y.-q. Ma, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 122, e2421518122 (2025)

6952

离子扩散泳驱动的活性胶体运动及自组装：理论及实验研究

高永祥*

深圳大学

催化胶体粒子（亦称化学活性胶体）能够在局部液体环境中催化反应，将化学能转化为界面流动，从而产生自驱运动、非平衡相互作用及多样的自组织行为。尽管已有多种机制被提出以解释其动力学特征，现有理论与实验研究仍缺乏系统性和定量性，导致其驱动与自组装机制长期存在争议。在本研究中，我们基于经典离子扩散泳理论，构建并发展了适用于催化胶体体系的理论模型，系统引入有限德拜长度、生成离子与背景离子浓度的耦合效应。我们分别研究了依赖瞬态离子的赤铁矿-TPM 胶体体系，以及以稳定离子产物为主的银-TPM 胶体体系，实验结果与理论预测高度一致，揭示了离子扩散泳主导下的自驱机制。此外，我们将该模型拓展应用于 NOCOP-TPM 二元活性胶体体系，实现了对其复杂动力学行为的定量描述。本研究不仅增进了对化学活性胶体驱动机制的理解，也为多体系统的集体行为预测、高性能微纳马达设计及多组件微纳机器构建提供了理论依据与实验支持。

Gaussian curvature-guided pattern formation of active fluids on curved surfaces

Rui Ma*

Xiamen University

In this talk, I will present our recent study of pattern formation in active fluids confined to curved surfaces, motivated by the dynamics of the actomyosin cortex in cells, where myosin motors generate contractile active stresses. These motors, which diffuse along the cortex, are advected by actin flows arising from stress gradients. We focus on motor and flow dynamics on a prolate surface that mimics the geometry of a cell cortex. As motor contractility increases, we observe the formation of a motor cluster at the poles of the prolate, where the Gaussian curvature is high. Remarkably, upon further increasing contractility, the cluster shifts from the poles to the equator, where the Gaussian curvature is lower. This transition arises from the distinct ways in which Gaussian curvature influences diffusion and advection. Our results reveal a general physical mechanism for curvature-guided pattern formation in active systems on curved surfaces.

9443

混致不溶现象的微观起源及其对嵌段共聚物自组装行为的影响

李宝会*

南开大学

混致不溶 (co-nonsolvency)，即高分子在两种可混溶的、单独使用时均为其良溶剂的混合溶剂中呈现不溶的现象，是高分子领域最有趣的现象之一。混致不溶现象已经被广泛研究，发现对单链高分子体系而言，混致不溶可导致链塌缩。并且近年来已经提出了几种驱动这一现象的机制，如优先吸附机制、氢键机制、两种溶剂分子相互结合形成复合体机制，以及两种溶剂分子之间的吸引诱导的相分离机制等。然而对这些机制一直存在争议。另外，当嵌段共聚物的一个嵌段发生

混致不溶现象时，该现象可诱导嵌段共聚物自组装或影响其自组装行为。然而尚缺乏对这种影响的系统研究。本报告将介绍我们使用模拟退火方法对混致不溶现象的微观起源及该现象对嵌段共聚物自组装行为的影响的研究结果。我们的研究体系中包括高分子单链和多链体系，其中高分子为两嵌段共聚物和均聚物。我们首次发现体系中高分子/溶剂间的相互作用和溶剂混合熵之间的竞争是导致混致不溶现象的主要原因；并且，这一结论得到了 Flory-Huggins 理论的证实。另外，我们首次发现发生混致不溶现象的体系中溶剂发生液-液相分离，以及多链体系中链凝聚，而单链体系中链卷曲。针对其中一个嵌段可发生混致不溶现象的两嵌段共聚物/二元溶剂体系，发现混致不溶效应可导致共聚物自组装形成多种胶束和囊泡；并且，混致不溶效应与疏溶剂作用的协同可进一步增加胶束的种类。

3214

动态交联高分子网络的蠕变屈服理论研究

孟凡龙*

中国科学院理论物理研究所

动态交联高分子网络通常在低温时表现和热固性材料类似（具备非常优秀的力学特性），在高温时可以通过键交换实现高分子网络拓扑结构的重塑（和热塑性材料类似）。我们通过构建针对键交换速率较低动态交联高分子网络的连续型理论模型，研究了动态交联高分子网络在施加固定大小应力场景中的蠕变屈服特性，发现动态交联高分子网络可以在不同外部条件下实现应变变稠、应变变稀等流变学响应，给出了动态交联高分子网络的动力学响应相图。

3149

冷冻电镜技术在软物质结构研究中的应用

雷东升*

兰州大学

冷冻电镜技术作为对蛋白、核酸、凝胶等软物质进行显微成像和结构表征的有力手段，在生物、医药和材料科学等领域的重要性日益凸显。我们利用冷冻电镜单颗粒重构和微晶电子衍射技术，对 NAL1 蛋白酶、口蹄疫病毒、自组装材料等研究对象开展了结构与功能研究。其中，NAL1 水解酶的高分辨率三维结构揭示了其 233 位残基作用于 291 位天冬氨酸，可导致催化三联体变构、水解活性调整的分子机理；口蹄疫病毒-抗体复合物的冷冻电镜结构帮助我们识别出关键的抗原决定簇，为跨血清型广谱保护性口蹄疫疫苗的设计提供新的靶点信息；对多种小分子自组装材料的结构解析为深入理解这些材料的构效关系、优化材料性能提供了线索。期待相关内容可为冷冻电镜更广泛的应用提供帮助。

2834

玻璃低频过剩振动模式与声波衰减关联性

王利近*

安徽大学

晶体低频振动模式态密度与频率的标度关系遵从德拜理论预测；然而，玻璃低频振动模式态密度比德拜理论预测值大，即，相比于理论预测，玻璃中存在低频“过剩模式”。对玻璃中低频过剩模式特性的研究对理解实验中观测到的玻璃低温反常热力学性质至关重要。1983 年 Karpov 等

人通过理论预测：不依赖于空间维度，玻璃低频过剩模式态密度正比于频率的四次方。2015 年，诺贝尔物理学奖得主 G. Parasi 与其合作者通过数值模拟研究首次发现，三维自旋玻璃的低频过剩模式态密度与频率的四次方呈正比关系。此后，学术界开展了大量数值模拟工作，以深入探讨结构玻璃低频过剩模式态密度的特性。在本报告中，我将结合自身及合作者近期的研究工作，介绍近年来关于结构玻璃低频过剩模式态密度的研究进展。此外，介绍我们近期在低频过剩模式态密度与声波衰减关系研究方面的最新进展。

参考文献：

- [1] D. Xu#, S. Zhang#, H. Tong, L. Wang*, and N. Xu*, Low-frequency vibrational density of states of ordinary and ultra-stable glasses, *Nat. Commun.* 2024, 15, 1424.
- [2] L. Wang*, G. Szamel, and E. Flenner*, Scaling of the non-phononic spectrum of two-dimensional glasses, *J. Chem. Phys.* 2023, 158, 126101.
- [3] L. Wang*, L. Fu, and Y. Nie*, Density of states below the first sound mode in 3D glasses, *J. Chem. Phys.* 2022, 157, 074502.
- [4] L. Wang*, G. Szamel, and E. Flenner*, Low-frequency excess vibrational modes in two-dimensional glasses, *Phys. Rev. Lett.* 2021, 127, 248001.

基金项目：国家自然科学基金项目（NO. 12374202 and NO.12004001）。

7895

流体诱导的纳米纤维排列用于构建各向异性水凝胶

朱水洪*

福州大学

天然结构材料通常具有强度和韧性的独特组合，这是由于它们在多尺度上的复杂层级组装所导致的。受天然结构材料启发，动态调控高分子聚合物的结构形成与转化对设计和开发高性能的软凝聚态体系具有十分重大的意义。然而，通过一种通用且可扩展的方式在合成软物质材料中设计类似高度有序的结构仍然存在巨大的挑战。我们利用纳米原纤维的流动诱导取向，开发了具有高度有序层级排列结构的各向异性纤维水凝胶。目前各向异性水凝胶的设计策略主要集中于冷冻铸造和机械应变，这些制备工艺通常复杂耗时且很难应用于大规模的生产。而通过将这种流动诱导排列的方法与成熟的工业制造技术相结合，可以动态调整聚合物网络，而无需使用增强材料、高时间/能源消耗和繁琐的后处理。这项研究阐述了多尺度强化和增韧机制，为基于简单模块的软物质结构的设计和开发提供了一个全新的发展方向，有望可以促进合成结构材料在生物工程、药物输送、水处理和软电子领域等的应用。

Mesoscale simulation approach for odd fluid

Yuxing Jiao, Mingcheng Yang*

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190

A fluid, with breaking time-reversal symmetry, would exhibit odd transport coefficients, such as odd viscosity, thermal conductivity and diffusion coefficient, which may fundamentally alter the fluid properties and significantly influence the structure and dynamics of immersed objects. Here, we develop an efficient coarse-

grained simulation approach for the odd fluid that captures all essential features of real odd fluids. Based on microscopic kinetic theory, we analytically derive the transport coefficients for the mesoscale odd fluid. Furthermore, we validate our approach by performing both simulation and theoretical calculation to explore the intricate transport phenomena of the odd fluid under various external fields.

8063

界面附近的化学活性胶体

王威*

哈尔滨工业大学（深圳）

活性胶体作为活性物质的经典模型体系，是一类能够将环境能量转化为自身运动，或产生粒子间吸引、排斥相互作用的特殊胶体粒子，在软物质物理、胶体与表界面化学及仿生材料等领域受到广泛关注。其中，以表面化学反应为驱动机制的“化学活性胶体”是重要的研究分支。在实验研究中，化学活性胶体通常处于固液、气液、液液等界面环境中。这些界面通过改变化学活性胶体周围化学物质的浓度分布，进一步引发电场、流体场等物理场的变化，从而对活性胶体的个体运动行为及群体动力学特性产生显著影响。本报告介绍哈尔滨工业大学（深圳）王威课题组与合作团队近年来在此领域取得的系列实验研究成果。包括：通过实验测量结合理论分析，成功揭示了 Pt 基活性胶体在固液界面的倾角调控机制；阐明了 TiO_2/Pt 基活性胶体与固液界面间反常吸引力的作用原理；并首次发现多种化学活性胶体在油水界面环境下呈现显著的运动加速现象。这些研究成果不仅深化了学界对界面与活性胶体相互作用规律及机制的认知，还进一步推动了化学活性胶体运动机制及其周围物理化学场分布的理论研究，为化学活性胶体在微纳机器人、智能材料等领域的应用开发奠定了坚实的理论基础。

8382

自驱动活性固体的自主运动和机械波

徐浩然*

浙江大学

Elastic active matter—also called an active solid—consists of self-propelled units embedded in an elastic matrix and it resists deformation. This shape-preserving property and the intrinsic non-equilibrium nature make active solids an attractive potential component for self-driven devices, but their mechanical properties and emergent behaviour remain poorly understood. Here, using a biofilm-based living active solid, we observe self-sustained elastic waves with wave properties not seen in passive solids, such as power-law scaling of wave speed with activity. Under isotropic confinement, the active solid develops two topologically distinct global motion modes that can be selectively excited, with a step-like frequency jump at the transition between the two modes. Our findings reveal spatiotemporal order in elastic active matter and may guide the development of solid-state adaptive or living materials.

9482

Study on deformation of cell membranes under abnormal physiological conditions

Hao Wu*

Wenzhou Institute University of Chinese Academy of Sciences

Cell morphology is an important signature for real-time analysis of cell death and metabolism, cellular differentiation and formation of structures, and disease early warning. Most of the previous studies on cell morphology have focused on that of normal cells and artificial vesicles in lab. In this work, we propose a novel tangent angle perturbation approach to analytically calculate large deformation of cells under abnormal physiological conditions. We obtained three main analytical solutions in axial symmetry case: biconcave shape, peanut shape, and two types of myelin shapes in which one resembles to dendrites of neural cells and the other is similar to spiked or necklace-like cell membrane of echinocytes. These axial symmetric shapes are in agreement with those experimentally observed in nonphysiological neural cells and red blood cells with myelin-like tubular membranes by dark-field light microscopy.

9143

各向异性活性材料中的湍流统计转变与拓扑缺陷动力学孙爱乐¹、罗曜坤¹、黎原²、游智鸿²、韦齐和*¹

1. 南方科技大学

2. 厦门大学

活性湍流广泛存在于自然界和生物系统中，通常由活性粒子在低雷诺数条件下的无序运动产生。尽管传统研究主要聚焦于各向同性介质中的活性流动，现实中的生物环境往往呈现显著的各向异性，其对活性湍流行为的影响尚不清楚。为此，我们构建了一个准二维活性液晶系统，在溶致液晶中引入游动细菌，通过液晶取向与形变调控细菌的聚集与扩散，细菌运动反过来又激发液晶中拓扑缺陷的生成与湮灭。实验结果表明，即使在较低的细菌浓度下，该系统已出现类似湍流的流动行为；随着活性增强，细菌速度的统计分布由非高斯逐步转变为高斯分布。这种统计转变源于拓扑缺陷引发的空间上非均匀的活性分布。我们进一步通过连续介质-活性粒子耦合模型和唯象模型对该机制进行了验证。此外，我们首次观测到 $-1/2$ 拓扑缺陷在湍流态中表现出持续的主动运动，这与传统上其被视为“被动缺陷”的认识不同。该研究加深了对活性湍流与拓扑缺陷耦合机制的理解，并展示了通过调控活性分布实现对缺陷动力学与整体流动模式调控的潜力，为构建可控结构与功能的新型软活性材料体系提供了理论依据和实验支撑。

7466

聚合物囊泡解组装动力学

姜伟*

武汉纺织大学

聚合物囊泡解组装是实现其功能的主要途径之一，在药物释放、病理检测等领域发挥着越来越重要的作用。另一方面，高分子解组装不仅是体系从有序态向新的有序态或无序态的相转变，也是典型的非平衡态动力学过程，具有路径依赖性。

本研究以光响应嵌段聚合物通过自组装形成的囊泡为对象，通过光照改变聚合物的性质和结构，使聚合物囊泡由稳定态变为不稳定态，囊泡发生解组装。我们通过模拟和实验相结合研究了聚合物囊泡解组装机学，并发现对同样的体系和条件下通过解组装的方法可以得到自组装方法所得不到的集聚态结构。

巨型 Nesprin-2 蛋白构象动态力学响应的单分子研究

乐世敏*

厦门大学

Nesprin 蛋白家族在细胞骨架与细胞核之间发挥着关键物理桥梁作用。由于外界机械刺激及核-细胞骨架动态变化，nesprin 蛋白在生理状态下持续承受力学作用。然而，其在这些生理力及加载速率下的动态特性仍亟待探索。本研究结合基于磁镊的单分子操纵技术、分子动力学模拟及 AlphaFold3 结构预测，系统研究了巨型 nesprin-2 蛋白中承力的血影蛋白重复序列 (SRs) 结构域的动力学特性。通过直接量化分析，我们首次揭示众多 SRs 结构域可在数皮牛顿 (pN) 力范围内发生机械解折叠。进一步研究表明，巨型 nesprin-2 可作为高效分子缓冲器，将核骨架-细胞骨架连接处的维持力精准控制在数 pN 范围。本研究全面阐释了 nesprin-2 的力学特征，为理解其在核骨架-细胞骨架机械信号转导中的核心作用提供了新见解。

3610

Single-molecule biosensing with framework nucleic acid materials

Honglu Zhang*

Shanghai Jiao Tong University

Biological study at the single-molecule level enables real-time, dynamic monitoring of processes such as the conformational changes, and interactions of biomolecules like DNA and proteins. Framework nucleic acid technology exploits the self-assembly of DNA to build nucleic acid architectures with precisely defined scaffolds, offering unique advantages in single-molecule bioanalysis: the programmable and highly specific recognition properties of nucleic acids allow the rational design of scaffolds with tailored structures and mechanical properties; the valence and spatial arrangement of sensing probe molecules can be precisely controlled; and, when coupled with dynamic self-assembly methods, dynamic sensing and intelligent analysis become possible.

In this report, we describe the construction of programmable framework nucleic acid structures combined with single-molecule manipulation tools (e.g., optical tweezers) and AlphaFold. By designing and building mechanically responsive sensing probes, we have developed a single-molecule manipulation and analysis system with ultrahigh spatiotemporal resolution. Using this platform, we performed real-time, dynamic observation and control of the folding process of a calcium-binding protein, capturing previously unresolved “hidden” intermediate states.

单分子核酸力学测量：核酸对外界扰动的响应机制

张晨*

浙江大学 物理生物学实验室

我们主要聚焦在单分子核酸力学的测量与分析，旨在揭示环境因素对 DNA 和 RNA 结构与功能的精细调控机制。通过高精度的单分子磁镊实验结合分子动力学模拟，测量分析单个核酸分子在不同环境条件下的结构力学性质变化。

拉力、温度和离子强度等环境因素均能够显著影响核酸的扭转角度，微小的扭转角变化在超长的 DNA 分子中积累，最终导致显著的结构变化。对 DNA 来说，环境因素变化首先改变了 DNA 的直径，并通过扭曲-直径耦合转化为 DNA 的扭曲变化 1。对于 RNA，环境因素变化首先改变大沟槽宽度，通过扭转-沟槽耦合转导成扭转变化的 2。扭转-沟槽耦合和扭转-直径耦合可以降低蛋白质结合时 DNA 和 RNA 形变的能量成本。我们不仅阐明了 DNA 和 RNA 的结构和力学性质对环境变化不同响应的具体分子机制，还建立了双链核酸形变途径选择模型。该模型也能很好解释高价阳离子结合导致 DNA 和 RNA 多种力学性质变化相反的这一反常现象。

此外，基于核酸的已知力学性质，针对不同测量需求，设计标定了多功能、可设计、可调节、生物相容性好的核酸力学可视化探针，实现了对活细胞运动过程中的力信号的实时动态空间成像 3。

参考文献:

- [1] Zhang, C.#; Tian, F#; Lu, Y.; Yuan, B.; Tan, Z.-J.; Zhang, X.-H.*; Dai, L. * Science Advances 2022, 8, eabn1384
 [2] Tian, F#; Zhang, C.#; Zhou, E#. C.; Dong, H.-L; Tan, Z.-J.; Zhang, X.-H.*; Dai, L. * PNAS 2023, 120 (20), e2218425120
 [3] Hu, Y.-R#, Li, H.-Y#*, Zhang, C#, Feng, J.-J#, Wang, W.-X, Chen, W, Yu, M, Zhang, X.-H.*, Liu, Z*, Cell 2024, 187(13), 1-15

8097

Non-Reciprocal Interactions between Passive and Active Particles

Ziluo Zhang*^{1,2}, Shigeyuki Komura¹, Rosalba Garcia-Millan³

1. Wenzhou Institute, UCAS

2. Xiamen University

3. King' s College London

In this work, we study a three-particle model, composed by a passive particle coupled to two active Brownian particles via non-reciprocal harmonic interactions. By using the Doi-Peliti field theory, and introducing Hermite polynomials as the corresponding eigenfunctions, we analytically obtain the bare propagators and perturbative vertices, and subsequently represent them diagrammatically. By summing all relevant diagrams through geometric series summation, we calculate correlation functions of the distances between particles and their orientations in closed form. Using these correlation functions, we further calculate the entropy production rate of this model exactly. We support our analytical results with simulations, and comparing with previous results in odd elasticity.

9767

一种实现微马达趋向性的新策略

朱睿童、王威*

哈尔滨工业大学（深圳）

智能微马达能够自主寻找到目标物体，在外部控制受限的实际应用中具有重要前景。传统策略多依赖微马达在梯度场中两侧产生不对称反应，实现自动对准梯度方向的定向运动。然而，随着微马达尺寸减小，需更大梯度场克服布朗运动，而实际生理环境信号梯度较小，亟需新方法以实现微弱梯度下的有效趋向运动。受自然界微生物如藻类和大肠杆菌在极弱梯度中趋性行为启发，我们提出并验证了利用轨迹曲率响应环境刺激的新策略，使微马达通过圆形轨迹的累积净位移，趋向曲率较小的区域。

我们在两个实验场景下验证了这一策略的有效性。第一种场景下，在较弱的过氧化氢（ H_2O_2 ，一种燃料）梯度中，本无法实现趋化运动的磁性聚苯乙烯-铂（PS-Pt）Janus 微球，在旋转磁场的作用下呈圆形运动轨迹，表现出了显著的正趋化性。第二种场景下，一种蝌蚪形、具有光化学活性的微旋转器在低光强区域形成更大的圆周轨迹，表现出负趋光性。我们的研究结果为微马达在微弱梯度场中实现趋向性运动提供了一种有效策略。这一策略对于在肿瘤附近或深孔隙等复杂环境中，向释放微弱化学信号的特定目标进行定向输送具有潜在的应用价值。

10220

剪切诱导构建二维片层结构的水凝胶及其增强韧性机制研究

王森、林友辉*

厦门大学

天然材料如珍珠母、肌腱和肌肉，凭借高度有序的各向异性分层结构，实现了卓越的力学性能，兼具耐久性、韧性和柔韧性。然而，许多合成材料由于其网络结构无序、缺乏多尺度结构设计，难以复制这种优异性能。在本研究中，我们提出了一种新颖的“絮凝-冻结-辊压”（flocculating-freezing-rolling）方法，成功构建出具有二维片层结构的各向异性水凝胶，实现了多尺度增韧与机械稳健性的统一。该方法借助盐析作用，通过剪切力逐步诱导聚合物链取向排列，从而分层构筑取向结构，标志着材料设计策略从传统的组分调控向以外力驱动为核心的转变。所制备的水凝胶展现出优异的力学性能，包括 41.29 ± 2.10 MPa 的拉伸强度、 159.37 ± 28.15 MJ·m⁻³ 的韧性和 97.94 ± 14.67 kJ·m⁻² 的断裂能。此外，沿取向方向显著提升的热导率使其在轻质热管理系统中具有广阔的应用前景。本研究建立了一种可扩展且通用的高性能各向异性材料构筑平台，为先进功能材料的发展奠定了坚实基础。

3128

基于幂律分布实现生物凝聚体指数尺寸控制

黄一帆、唐传、汤启云*

东南大学

生物凝聚体是细胞内由生物分子形成的无膜液滴，它们在基因调控、细胞信号传导等过程中起着重要作用。生物凝聚体的大小分布通常遵循幂律分布，这种分布的尺度不变性使得精确控制其大小成为挑战。本研究通过大规模计算机模拟和凝聚体合并的动力学理论，提出了一种新的机制，可以通过幂律分布实现生物凝聚体的指数型大小控制。本研究使用了凝聚体合并的动力学理论和分子动力学模拟，通过研究凝聚体的合并过程，揭示了团簇聚结是导致生物凝聚体幂律分布的重要原因。值得注意的是，随着单体浓度的增加截至体积随之指数增长。其中，模拟中的纳米尺度的凝聚物可以通过理论合理外推到实验中的微米级液滴。这一发现提供了一个新的机制，通过幂律分布快速将生物凝聚物调整到适当的大小。本研究的这一发现不仅深化了对生物凝聚体形成机制的理解，还为实验中精确控制生物凝聚体的大小提供了理论依据。未来的研究可以进一步探索这一机制在生物学和其他非平衡系统中的应用，推动相关领域的发展。

微丝骨架交联蛋白的力学调控机制研究

张宇航、乐世敏*

厦门大学

在细胞中，由多种力感应蛋白构成的微丝骨架能够感知并响应机械力，这一过程对细胞的运动、迁移、分化至关重要。微丝骨架结构的机械稳定性由一系列交联蛋白所调控。其中， α -辅肌动蛋白广泛存在于应力纤维的交联网络、平行束网络以及肌节网络结构中。 α -辅肌动蛋白在自然状态下以同源和异源二聚体形式存在，是微丝骨架的重要力承载单元，同时也是多种力感应蛋白的关键枢纽。 α -辅肌动蛋白二聚体的机械力稳定性是其生理功能性的决定因素，但其机械稳定性在很大程度上并未得到清晰的研究。我们的工作聚焦于 α -辅肌动蛋白及其上下游蛋白信号通路，使用单分子磁镊设备在生理力和生理加载速率下定量一系列微丝骨架交联蛋白以及蛋白与蛋白相互作用界面的力学稳定性，分析其中隐藏的折叠/解折叠以及断裂/聚合行为，进而剖析微丝骨架交联蛋白网络的力学调控机制。

10232

三维细菌液滴的非平衡动力学

黎玉林¹、常瞰²、张何朋²、游智鸿*¹

1. 厦门大学

2. 上海交通大学

细胞中的非平衡液滴在生命活动中扮演着关键角色，因此研究液滴在非平衡系统中的行为显得尤其重要。在本次报告中，我们通过实验、数值模拟和理论计算，探究了包含三维细菌液滴的物理特性。这一特殊构型使得细菌能够驱动液滴，产生新奇的几何形态与动力学行为。当细菌活性低时，细菌湍流会导致界面产生特定尺度的非平衡涨落；同时活性作用会将惯性重新引入过阻尼系统中并产生界面波。而在高活性细菌的驱动下，液滴会发生极端形变并产生一系列有趣的行为。这些结果帮助我们更好地理解活性物质与界面之间相互作用的机制。

Mechanically weak and highly dynamic state of mechanosensitive titin Ig domains induced by proline isomerization

Yukai Wang, Shimin Le*

Xiamen University

Titin, essential for mechano-homeostasis in cardiac and skeletal sarcomere, contains numerous mechanosensitive immunoglobulin-like (Ig) domains in its I-band region. However, how proline isomerization and cysteine-mediated disulfide bond collectively regulate Ig domain dynamics within the physiological force range remains unclear. Here, we use single-molecule force spectroscopy to quantify the proximal Igl domain, revealing that proline isomerization leads to two native states - trans and cis states - with distinct mechanical and thermal stabilities. The trans-Igl unfolds at forces of ~ 5 pN, which is over 50 pN lower than that of cis-Igl, and unfolds 1000 times faster under physiological forces. Furthermore, such proline induced dual-state is likely shared feature across majority of I-band Ig domains. Additionally, reduced cis- and trans-Igl exhibit catch-slip bond unfolding, while

oxidized forms display slip-catch-slip unfolding. This study offers insight into effective modulation of proline isomerization and disulfide bond in regulating mechanosensitive proteins within the physiological force range.

9935

通过湿度和温度理解与调控 Quincke 转子的集群行为

乔子涵¹、张波²、王威*¹

1. 哈尔滨工业大学（深圳）

2. 南京大学

活性物质的一个显著特征是能够在群体层面涌现出个体单元所不具备的集群行为。尽管理想条件下的集群行为已得到广泛研究，但现实世界环境的复杂性同样不容忽视。本研究利用 Quincke 转子系统，探究了温度、湿度等外部环境因素对系统动力学的影响。实验发现，提高环境湿度或温度会驱动集群行为发生转变：从涡旋（Vortex）依次演变为极向团簇（Polar Clusters）、旋转团簇（Rotating Clusters），最终形成活性晶体（Active Crystals）。这一转变源于环境因素显著改变了系统的电学特性，特别是介质溶液的导电性。基于此，我们提出了一个考虑转子成对相互作用的理论框架来解释集群行为的演化。该理论综合考虑了偶极相互作用（Dipole）、电流体动力学流动（Electrohydrodynamic flow）以及流体动力学相互作用（Hydrodynamic Interaction）。这项工作通过利用系统对环境变化的敏感性，实现了对集群行为的原位调控，为理解活性物质在真实环境中的行为提供了新的视角。

6522

利用可变的超材料像素阵列实现时空调制的热成像

付聪、傅天淇、苏山河、林友辉*

厦门大学

虽然时空调制的超壳体将二进制数字热信号的控制拓展到时域，但它们缺乏可视化效果，而且将连续值物理量二进制化会牺牲单个像素的大量图像信息，这阻碍了基于超表面的成像应用。在此，我们提出了一种热可视化的超表面，其由可变的超材料像素阵列组成。每个热成像像素（TIP）在静止的固态块体内部集成了一个时变转速的旋转圆柱内核，以调节块体表面温度。模拟结果表明，在红外观察下，超表面可以生成各种虚拟物体的热图像。实验上，构建的单个像素磁力驱动的旋转同心结构证实了其可重构性和可调节性。这项工作建立了一种实用的动态热可视化策略，为热显示、模拟传导计算和熵增强的红外信息系统铺平了道路。

6798

活液晶的“连续场-粒子”复合模型

黎原¹、游智鸿*¹、罗曜坤²、孙爱乐²、韦齐和²、陈明凯²

1. 厦门大学

2. 南方科技大学

活液晶（Living liquid crystals）是由向列相液晶与浮游细菌组成的一种复合活性流体，其活性（细菌）与非活性组分（液晶）的相互作用可以诱导大量有趣的集体行为。当前描述此系

统往往采用连续场模型，在许多条件下会产生非物理的奇异行为，给模拟及解析分析带来了许多困难。针对这些问题，我们开发了一种“连续场-粒子”的混合模型：利用连续场描述液晶的演化及流动，而将细菌看成自驱动的点粒子。利用此模型，我们成功复现了活液晶在不同条件下的自组织。此模型可作为探究活液晶的自组织及调控的有力工具。

基于微结构调控的强韧 PDMS 复合材料冲击波耗散性能研究

徐经宇^{1,2}、魏春¹、刘忠平¹、毛超英*¹

1. 中国工程物理研究院·化工材料研究所

2. 中原工学院·纺织服装产业研究院

本研究设计了一种具有颗粒介导微观结构的高强高韧聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 复合材料，用于冲击波能量耗散。通过调控颗粒表面化学性质，成功制备出团聚体结构和均质分散结构的复合材料。与纯 PDMS 相比，团聚体结构复合材料的强度和韧性分别提升 65% 和 280%，而均质分散结构复合材料则分别提升 90% 和 433%。激光诱导冲击压缩实验表明，均质分散结构复合材料表现出更优异的能量耗散能力，其冲击波峰值压力最大降低 75%，优于团聚体结构的 43%。研究发现，团聚体结构的能量耗散机制源于 PDMS 基体的快速链段动力学、低玻璃化转变温度、团聚体破碎及界面波散射效应；而均质分散结构的增强效果则归因于颗粒/基体界面处冲击波反射效应的强化。该研究为构建具有可控微观结构的能量吸收材料提供了新策略，在人员装备防护领域具有重要应用价值。

Harmonizing Competing Intermediates: A Unified Free Energy Landscape of Protein RNase H

Ping Yu, Hu Chen*

Xiamen University

While single-domain proteins often exhibit two-state behaviors, some proteins demonstrate complex folding pathways with intermediate states. Here, we investigate force-induced conformational transitions of RNase-H using magnetic tweezers and reveal structurally distinct intermediate states in the folding and unfolding processes. The unfolding intermediate, observed at forces above 8 pN, represents a partially unfolded state with the C-terminal helix detached, while the folding intermediate, observed below 6 pN, corresponds to a partially folded state with only the core region formed. Despite these structural differences, our comprehensive kinetic analysis demonstrates that both intermediates can be integrated into a unified quantitative free energy landscape along a single transition pathway. This reconciliation of competing folding intermediates provides fundamental insights into the complex dynamic behaviors of proteins in which different intermediate states are observed.

纽结拓扑生物分子的力学稳定性和动力学研究

张珠伟、陈虎*

厦门大学

纽结在生物大分子中是常见的，有些是随机缠绕形成的，有些是进化产生的。随着对核酸和蛋白质结构研究的深入，不同类型的纽结拓扑被发现。这推动了对生物分子中纽结的形成机制和特性的深入研究。

核酸纽结在生物系统中发挥着重要的作用，从寨卡病毒中能够抵御核酸外切酶的 RNA 纽结到影响噬菌体遗传物质释放的 DNA 纽结。为了深入研究 DNA 纽结的特性，我们设计了能够形成 31 结拓扑和 52 结拓扑的 DNA 序列，并使用单分子磁镊进行了力学稳定性表征和动力学研究。结果表明 DNA 结构的力学稳定性随着拓扑结构复杂程度的升高而增强，并揭示了 DNA 52 结的形成需要历经能量景观中的多个亚稳态。

在蛋白质数据库中，约 1%的蛋白质可被归类为蛋白质纽结。目前，蛋白质中纽结拓扑的功能尚未研究清楚，但纽结区域通常与蛋白质的功能位点重叠。此外，纽结拓扑在增强蛋白质的配体结合能力和稳定性方面具有重要作用。借助单分子磁镊技术，我们揭示了在外部机械力的作用下，31 活结，31 纽结，71 纽结蛋白展现出随着纽结复杂程度增加而逐步提升的力学稳定性及独特的动力学特征。

2032

基于单宁酸增强的聚吡咯/聚醚酯导电纤维构建深度学习辅助膝关节畸形诊断系统

刘金沂¹、易佳²、付莲莲*¹

1. 华侨大学材料科学与工程学院

2. 厦门大学物理科学与技术学院

导电纤维作为可穿戴设备中必不可少的部分，在人体运动监测、健康诊断等领域展现出独特优势^[1,2]。特别是在足底压力监测方面，其准确测量对于早期发现下肢畸形、预防运动损伤等健康问题具有重要意义。然而，传统足压监测技术(如薄膜压力传感器)存在精度低、舒适性差、需频繁校准等缺陷，限制了长期使用。

本研究通过静电纺丝结合浸泡法制得一种单宁酸增强的聚吡咯/聚醚酯导电纤维(TPEE-PPy-TA)，基于该材料组装的足压鞋垫结合深度学习可以实现膝关节畸形的检测。单宁酸(TA)掺杂在聚吡咯(PPy)中，不仅使导电网络结构更加稳定，而且可明显提升导电纤维的可拉伸性^[3]，从而使TPEE-PPy-TA纤维获得优异的导电性能(电导率为 2.99 S/cm)和良好的柔性(断裂伸长率达到 380%)。此外，TPEE-PPy-TA纤维具有优异的电/光热双响应特性和循环稳定性。作为压力传感器时，该导电纤维表现出宽范围灵敏度(0-30 N)和超快响应/恢复时间(20/10 ms)，并在 10 N 负载下展现出长期耐用性。TPEE-PPy-TA纤维不仅能精确监测手指运动、手腕活动和肘部弯曲等人体动作，还可实现基于触觉信号的摩斯密码传输。通过深度学习算法对膝关节屈曲信号进行分析，该导电纤维对膝内翻/外翻畸形的诊断准确率达到 98%，有望于为新一代智能纺织品在健康监测等领域的应用开辟新的途径。

参考文献:

1. Song X K, Ji J J, Zhou N J, et al. Progress in Materials Science, 2024, 144: 101288.
2. Li X H, Chen S, Peng Y J, et al. Sensors, 2022, 22(8): 3028.
3. Li W X, Li Y M, Shan M Q, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(36): 48329.