

典型软物质体系的结构、性质及其应用

林友辉, 张志森, 郭文熹, 吴建洋, 曹学正, 陈 虎, 帅建伟, 吴晨旭*

(厦门大学物理科学与技术学院, 生物仿生及软物质研究院, 福建省柔性功能材料重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 软物质是当代物质科学研究的重要组成部分, 其独特的性质与功能、丰富的物理内涵及应用前景引起了众多研究者的兴趣。随着研究的深入, 人们对软物质的基本共性如熵致有序等的认知逐渐加深, 但至今软物质物理尚未建立起统一的研究范式。本综述主要总结厦门大学软物质团队近年来围绕软物质基础和应用方面所取得的进展: 首先介绍几种典型软凝聚态体系结构与性质的关联研究进展, 包括液晶、水及气水合物、蛋白质、聚合物复合体系和类聚合物; 其次总结了生命软物质体系的相关进展, 如细胞信号传输、神经网络系统; 最后综述了本团队在柔性电子及能源器件上的成果。

关键词: 软物质; 动力学机制; 力学性质; 柔性电子; 生命体系

中图分类号: O 469

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2021)02-0000-13

“软物质”自 1991 年由法国诺贝尔奖获得者 De Gennes 正式命名后, 迅速发展为一个高度交叉的研究方向, 由此软物质物理学极大地拓展了物理学的研究对象^[1-3]。物质“硬”与“软”根据它们对外力作用的响应来定义, 不同于硬物质对外界的压力或拉力作用有很强的抵抗力, 在外部刺激下软物质材料表现为容易流动和变形等特征^[1-3]。软物质材料包括液晶、胶体、凝胶、聚合物和表面活性剂等, 它们存在于日常用品和工业生产中, 如豆腐、肥皂、织物、牛奶和油漆等, 甚至人体除骨骼和牙齿外也都是由软物质所构成。尽管软物质无处不在且与人们的生产生活息息相关, 但有关于软物质体系的科学研究仍然是一个尚未成熟的前沿学术领域。由于软物质所具有的显著不同于硬物质的某些性能, 以及现今软物质实验研究和相关应用的快速发展, 传统的凝聚态物理和统计物理理论不能满足对软物质体系性能与特征的解析。因此, 发展实验技术、理论和模拟手段对软物质的深入探索将有助于未来众多关键行业技术的发展, 包括柔性电子、生物医药、环境保护、汽车、航空、智能材料与机器人等。

厦门大学软物质团队从事范围广泛的软物质课题研究, 在软物质力学、生命软物质结构与性质、软物

质理论与模拟、生命体系与生物表界面, 以及软物质柔性电子应用等方向上取得了一系列的突破。本综述主要总结本团队近年来围绕软物质基础和应用方面所取得的进展。首先将介绍几种典型软凝聚态体系结构与性质关联研究进展, 包括液晶、水及水合物、蛋白质大分子、聚合物复合体系和类聚合物; 其次总结了生命软凝聚态体系的相关进展, 如细胞信号传输、神经网络系统和生物表界面现象; 此外, 柔性电子及其能源器件作为软物质的一个重要应用方向, 在人工智能、能源、大健康等领域变得越来越重要。

1 软凝聚态体系结构与性质的关联研究

1.1 电场调控液晶与悬浮颗粒相互作用

液晶是一种介于固态晶体和液体之间且具有各项异性的软物质。在过去的 20 多年中, 胶体颗粒悬浮在液晶中所产生的有趣现象和行为引起了学术界的广泛关注和研究, 在新型的液晶显示设备、拓扑记忆存储设备、拓扑材料以及生物医学探测器等领域具有广泛的实际应用前景^[4-5]。在胶体颗粒与液晶盒子共存的体系中, 尽管颗粒与颗粒之间、颗粒与盒子边界的相互作用已有相关的实验、理论和计算机模拟研

收稿日期: 2020-10-29 录用日期: 2021-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(11974292, 11874310, 11772278, 11874309, 11675134); 福建省自然科学基金(2019J06001)

* 通信作者: cxwu@xmu.edu.cn

引文格式: 林友辉, 张志森, 郭文熹, 等. 典型软物质体系的结构、性质及其应用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(2): 0000-0000.

Citation: LIN Y H, ZHANG Z S, GUO W X, et al. Structures, properties and applications of typical soft matter systems[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2021, 60(2): 0000-0000. (in Chinese)

究,但是在外场的作用下单个胶体颗粒与盒子边界的相互作用在理论上仍未完全解决. 本团队^[6-7]通过格林函数法解析出在外电场的调控下胶体颗粒和液晶盒整个悬浮体系的相互作用能,进一步研究胶体颗粒在液晶盒中的相互作用,发现外电场可以触发悬浮胶体颗粒的位置相变,外电场的阈值与 Fréedericksz 转变的阈值成正比;而且触发胶体颗粒发生位置相变的临界电场与液晶弹性常数和液晶盒子宽度的依赖关系,类似于 Fréedericksz 转变中电场与这两个参数的依赖关系,即临界电场与弹性常数的平方根成正比,与盒子宽度成反比;同时,为了研究临界电场与胶体颗粒的大小以及密度之间是否存在依赖性,对不同大小和密度的胶体颗粒在液晶盒子中发生位置相变的临界电压进行了数值模拟,发现电场的临界值与胶体颗粒的大小以及密度之间不存在依赖关系;此外还探讨了液晶分子的介电常数、不同锚泊方向与外电场的施加方向之间的组合对悬浮胶体颗粒产生位置相变的可能. 上述研究为电场调控液晶中的悬浮颗粒的应用奠定了理论基础.

1.2 水与水合物的结晶动力学与微纳力学性质

1.2.1 水结晶动力学

水的结冰现象与人类生活中许多重要方面息息相关:从自然气候到人类社会,从经济学到生物医学研究领域,水结冰现象深刻地影响着人们的生活环境和生活活动. 尽管目前关于水结冰的研究已经取得了长足的进展^[8-12],然而人们对于水结冰的微观机制仍未达成共识. 根据结晶成核原理,微观的成核阶段是宏观晶体形成的先决条件,因而对水结冰的调控需要从冰的成核阶段着手. 目前水结冰研究发现^[11-14]:理想的无杂质纯水结冰的成核势垒非常高,以至于在可预见的时间段里,很难看到理想纯水结冰成核现象的发生. 而外界杂质或固体表面的引入,可以大大降低水结冰成核的势垒,从而加速其成核过程,也即通常所说的异相成核现象. 结合本团队在结晶成核调控^[15-18]以及水结冰成核方面^[13,19-20]的研究基础,本团队总结了影响异相成核速率的因素,除了与结晶成核研究领域所熟知的固液界面的界面能有关外,还与相关研究领域不太关注的基底的界面结构尺寸、几何结构、有效接触面积 S_{Area} 以及外场因素诱导的有序结构等有密切关系(图 1)^[20]. 由于临界尺寸与过冷度的依赖关系,在过冷度很小的情况下,由杂质或固体界面所诱导的传统意义上的异相成核机制将失去作用,水

结冰的成核能垒将趋近于其均相成核能垒,结冰将由“类均相成核”的新机制控制. 在这种条件下,本团队通过成核实验,准确地测量出冰-水的界面自由能这一公认的难以准确获得而又十分重要的参数. 同时,这一原理基础也给出了界面结构抗冻的新概念,为界面抗冻的研究指明了新的思路和方向.

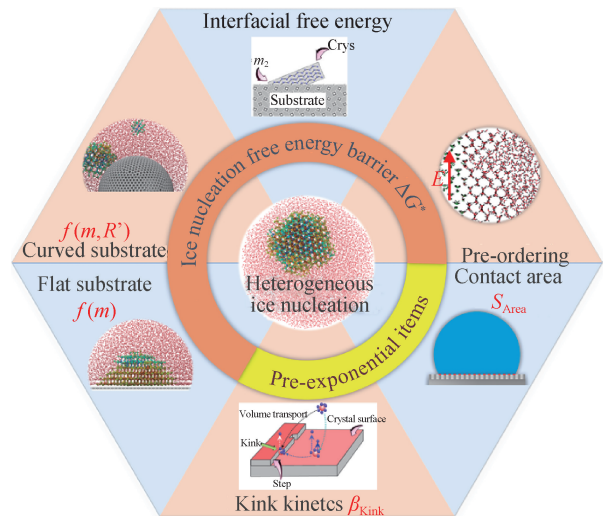
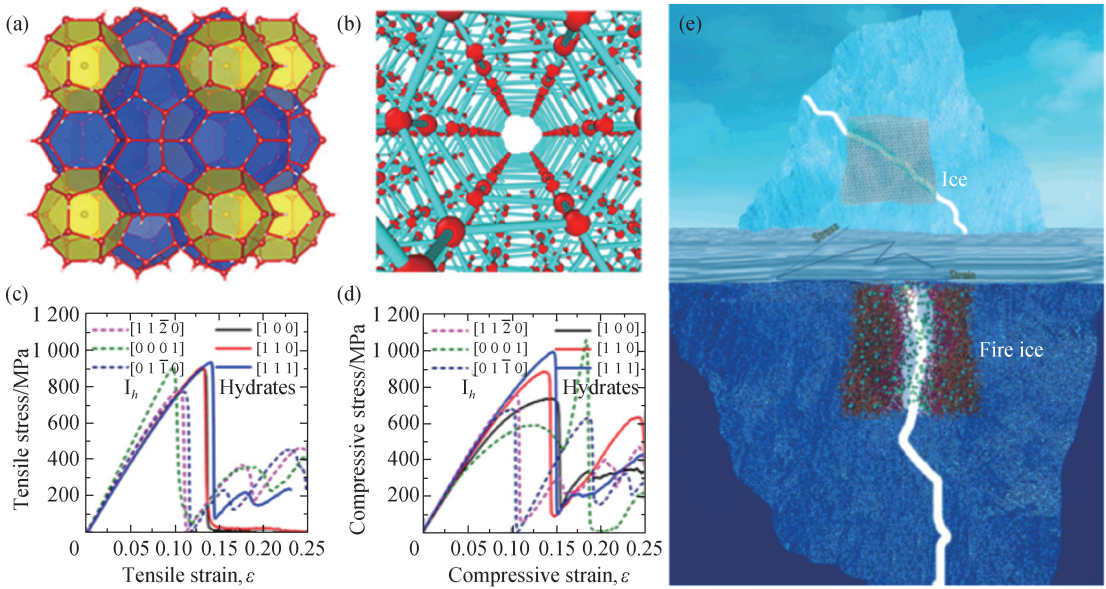


图 1 水结冰异相成核的影响因素^[20]

Fig. 1 The influencing factors of heterogeneous nucleation^[20]

1.2.2 可燃冰微纳力学性质

天然气水合物(又称“可燃冰”)作为 21 世纪一种潜力巨大的非常规能源,具有重要的能源与环境效应,日益受到各个国家和研究机构的关注. 在自然界中,天然气水合物广泛分布于海底沉积环境与陆地永久冻土区域,其失稳分解可以触发地质灾害^[21-22]、影响气候环境变化^[23-24]等. 然而,由于水合物复杂的赋存环境、物质组成以及沉积物的异质性,含水合物沉积物的力学性质仍面临诸多挑战. 为理清含水合物沉积物的力学行为,获取纯水合物的力学性质,作为评价含水合物沉积物力学行为的基础数据显得尤为重要. 因此,本团队对天然气水合物系统的力学行为进行了初步的系统探究(图 2)^[25]. 首先,针对单晶水合物体系,研究发现应变速率、温度以及 $5^{12}6^2$ 水笼中的客体分子的占有率极大地影响水合物的力学行为;并且在天然气水合物结构中未发现位错行为,而在冰结构中发现位错行为. 据研究数据,本团队初步归纳出单晶水合物和单晶冰的力学行为差异的本质原因,在于水合物中的主客相互作用机制和氢键网络与荷载方向之间相对夹角的动态变化机制^[25-26]. 其次,针对双晶水合物体系,采用大规模分子动力学模拟研究了双晶冰-甲烷水合物以及双晶甲烷水合物在拉伸、压缩



(a) 水合物的分子结构; (b) 冰的内部分子结构; (c) 水合物-冰双晶体的拉伸应力-应变曲线;
(d) 水合物-冰双晶体的压缩应力-应变曲线; (e) 力学失稳示意图。

图 2 水合物的力学行为^[25]

Fig. 2 Mechanical properties of gas hydrates^[25]

和剪切荷载条件下的应力应变响应行为^[27]。双晶冰-甲烷水合物和双晶甲烷水合物的力学行为主要受晶界微观组织结构控制。在拉伸荷载下,水合物-冰双晶体与水合物-水合物双晶体均呈现脆性破坏,破坏起源于晶界微观组织结构区域。在压缩荷载下,水合物-冰双晶体、水合物-水合物双晶体均呈现塑性破坏特征;水合物-冰双晶体的压缩应力-应变曲线呈现两个峰值强度。在剪切荷载下,水合物-冰双晶体与水合物-水合物双晶体先呈现弹性力学特征,后表现为平稳变化特征或锯齿形变化特征,这主要受晶界滑移控制,并且伴随晶界微观组织结构的快速愈合过程^[27]。对于水合物-冰双晶体和水合物-水合物双晶体,二者的拉伸强度和压缩强度差别较小;但是水合物-水合物双晶体平均剪切强度约为水合物-冰双晶体的 3 倍^[27]。接着,针对多晶甲烷水合物体系,探究了含冰量对含冰多晶甲烷水合物力学行为的影响特性,结果显示含冰多晶甲烷水合物力学行为显示出对含冰量的明显依赖性^[27],例如:当含冰量为 0~70%,含冰多晶甲烷水合物力学强度降低;而当含冰量为 70%~100%,含冰甲烷水合物的力学强度增大的行为与已有的实验研究结果相吻合^[28]。在施加荷载过程中,多晶甲烷水合物体系内部的笼穴结构处于动态变化过程中,并且存在不常见的笼穴结构,如 5¹²6³ 和 5¹²6⁴ 等。整体而言,多晶体甲烷水合物体系的塑性变形机理非常复杂,通常伴随多

种微观机理的协同效应,如晶界滑移、晶粒转动以及结构转变等共同主导其力学行为^[27]。上述成果为本团队认识和理解自然界天然气水合物系统的力学行为提供了重要的微观理论基础,丰富了冰、水合物晶体断裂力学行为的基础研究,对理解地球上水合物储层的稳定性、安全性和结构演化,甚至对太空中可能赋存水合物的其他星球演化具有重要的启发意义。

1.3 蛋白质软物质的力学性质与多级结构形成机制

1.3.1 蛋白质折叠去折叠动力学的单分子拉伸研究

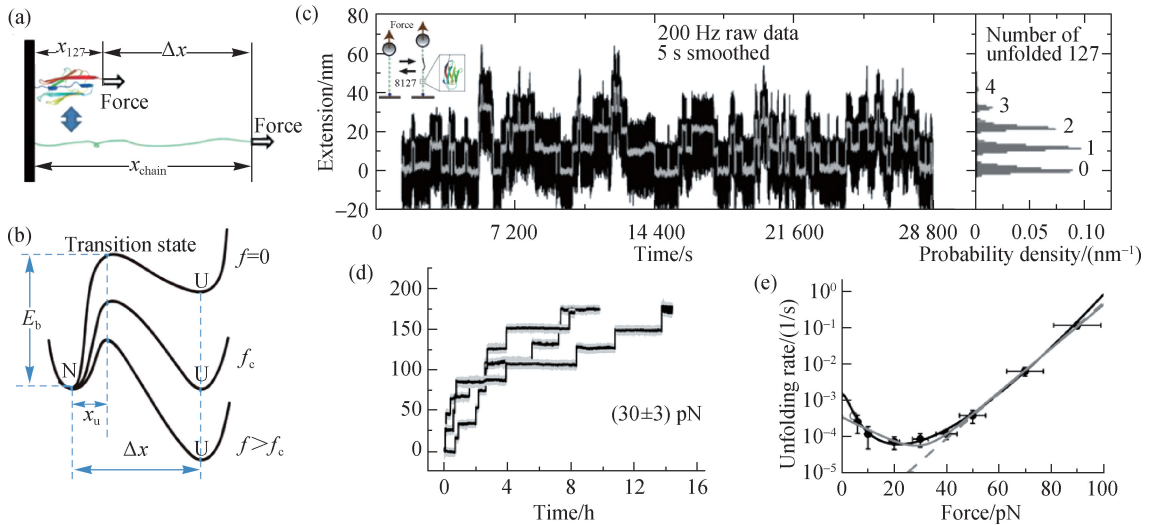
蛋白质作为重要的生物大分子,其具体的生物学功能依赖于每种蛋白质特定的结构与构象转变。生物体中大多数蛋白都具有由其氨基酸序列所决定的三维结构,但孤立的蛋白质二级结构往往是不稳定的。

蛋白质的三维结构可以用 X 射线晶体衍射、核磁共振或冷冻电镜等技术得到,但其稳定性和折叠动力学过程还需要通过设计精巧的实验来获得。常用的研究蛋白质折叠动力学过程的生化手段是控制蛋白质所处环境的温度、变性剂浓度来使得蛋白质发生相应的折叠或去折叠转变。但生化实验测量的物理量是所有蛋白质分子的平均性质,这使得可能存在的瞬时中间态往往被来自其他构象的信号所淹没而很难获得。

最近 20 年来逐渐发展完善的单分子操纵技术提供了另外一种研究蛋白质稳定性和折叠动力学的有效手段^[29-31]. 在单分子操纵实验中, 只有一个蛋白质分子被操纵并测量其结构状态, 这就避免了传统生化体实验的平均效应, 使得不稳定的中间态也有机会被测量到. 由于力学操纵中的外力做功可以精确定量计算, 单分子操纵技术也可以给出蛋白质折叠自由能的准

确测量.

近年来, 本团队利用单分子磁镊技术研究了肌联蛋白 titin、细胞黏附蛋白 α -catenin 和 β -catenin, 以及免疫球蛋白结合结构域 GB1、冷休克蛋白 CSP、纤维黏连蛋白 fibronectin 等的力学响应和折叠动力学. 下面以肌联蛋白 titin 的免疫球蛋白结构域 I27 为例介绍本团队的研究发现(图 3)^[32-33].



(a) I27 结构域在拉力作用下去折叠的示意图; (b) 不同拉力下蛋白质的自由能曲面; (c) 在 4.5 pN 作用下, I27 发生折叠与去折叠转变的实验测量曲线和构象分布直方图; (d) I27 发生去折叠的典型测量曲线; (e) I27 拉力依赖的去折叠速率.

图 3 利用单分子磁镊技术研究肌联蛋白 titin 的免疫球蛋白结构域 I27 的折叠与去折叠动力学和自由能曲面^[32-33]

Fig. 3 The folding and unfolding dynamics of muscle protein titin immunoglobulin domain I27 and its free energy landscape by magnetic tweezers^[32-33]

肌联蛋白 titin 是人体中最大的蛋白质之一, 贯穿整个肌小结, 是保证肌小结正确组装并维持其稳定的重要蛋白质. 在肌肉伸展过程中, titin 会受到拉力作用而伸展甚至发生部分去折叠, 其表现出的非线性弹性性质对于调节肌肉的弹性起到重要作用. 本团队将分子克隆技术表达的由 8 个 I27 结构域构成的蛋白质连接在玻璃表面与超顺磁球之间, 利用磁力对它进行拉伸^[32]. 在没有外力作用时, 蛋白质的自然状态 N 处于整个自由能曲面的最低点, 保证了其结构的稳定性; 在外加拉力作用下, 蛋白质的自由能曲面将发生倾斜^[32]. 随着拉力的增大, 去折叠状态 U 的自由能相对降低, 在临界拉力时, N 与 U 的自由能相等; 在大于临界拉力时, U 变成自由能最低的构象, 蛋白质会自发发生去折叠^[32]. 这样通过控制外力大小就可以对蛋白质的构象转变进行调制.

在接近临界拉力作用下, 可以同时观察到蛋白质的折叠与去折叠过程, 长时间的测量得到两种状态的

平衡态分布, 进而可以得到蛋白质的折叠自由能^[33]. 在拉力远离临界拉力时, 可以通过力跳变的方法来测量在该拉力作用下蛋白质的折叠速率或去折叠速率. 图 3(d) 中给出 30 pN 下 3 条 I27 发生去折叠转变的实验测量曲线. 通过分析蛋白质发生去折叠转变前的等待时间就可以得到蛋白质的去折叠速率, 而蛋白质去折叠速率对拉力的依赖关系可以给出蛋白质自由能曲面的信息, 特别是自由能势垒处过渡态的信息.

对于 I27, 本团队还发现其去折叠转变在拉力小于 22 pN 时去折叠速率随着拉力增大反而减小, 这就是所谓的逆锁键现象^[32]. 理论分析给出的模型考虑了过渡态的熵弹性性质, 在拉力小于 22 pN 时过渡态中的多肽链部分会发生蜷曲塌缩, 使得其长度短于自然状态的首末端长度. 这个模型很好地再现了 I27 的去折叠速率在 0~100 pN 范围内复杂的拉力依赖曲线(图 3(e)).

1.3.2 丝素蛋白多级结构的形成机制

近年来,科技的飞速发展让传统蚕丝制品焕发出新的活力.再生蚕丝制品结构多样,可以形成凝胶、纤维、支架、薄膜和海绵等.蜘蛛和蚕体内,丝蛋白转变成丝纤维是一个复杂的生化和物理变化过程.为了阐释这一过程,已有“液晶”和“胶束”等不同模型被提出.这两个模型可以解释丝在拉伸和剪切下的产生过程,但均无法解释无牵引作用下丝蛋白溶液仍能自发形成纳米微纤的物理现象.因此,迫切需要发展相应的高分子物理理论以诠释静态体系中分子链结构的构象转变及网络形成机制.鉴于此,本团队通过在丝素蛋白溶液中引入胶体小球,发展了丝蛋白网络结构形成的“成核-结晶”机理,阐释丝蛋白各级结构的形成机制,诠释了蚕丝高分子链的构象形变如何受控于纳米添加物;并从控制丝蛋白分子成核动力学和结晶过程的角度出发,实现了对结构的调控及其性能的提升(图 4)^[34].首先,溶液相中的丝蛋白分子以无规卷曲或 α 螺旋构象为主,通过成核过程转变为 β 折叠,进一步结晶形成 β 微晶;接着,无定型链连接 β 微晶形成具有拓扑结构的微晶网络;然后,进一步生长形成纳米微纤网络.实验发现纳米添加物可以控制蚕丝高分子链的构象形变,例如:胶体小球可以诱导丝素蛋白

在其表面发生异相成核,从而降低丝蛋白分子的成核势垒并加快成核速率,促进 β 折叠和 β 微晶网络的形成(图 4)^[34].由此,基于异相成核机理及纳米微纤相互作用方式,本团队从控制丝蛋白分子成核速率的角度出发,实现了再生纤维的断裂强度和弹性模量的有效提升^[34].

1.3.3 羊毛角蛋白网络结构形成策略及力学性质

从羊毛提取的羊毛角蛋白属于无定型聚合物,具有非常好的生物相容性和可控降解性,但与丝素蛋白相比,相关研究开发较少^[35-36].最核心的问题在于羊毛角蛋白分子链不能像丝蛋白一样自身成核结晶形成网络.针对这一问题,本团队根据羊毛蛋白结构特点,提出了两个新型策略诱导角蛋白链相互交联形成网络结构^[37-38].一种策略是将羊毛角蛋白巯基与四臂的聚乙二醇乙烯砜(PEG-4VS)作为亲电试剂发生迈克尔加成反应(图 5)^[38];另一种策略是通过简单的生化修饰赋予羊毛角蛋白的光敏特性.在光照下,光引发剂吸收光子能量产生自由基,自由基攻击接枝上碳碳双键的羊毛角蛋白,引发交联反应^[37].根据构型熵与耗散结构理论,纠缠交联网络在受到压应力撤销时,为达到构型熵最大化,连接点之间的羊毛角蛋白链段可以迅速复原,因此所设计的三维网络结构表现

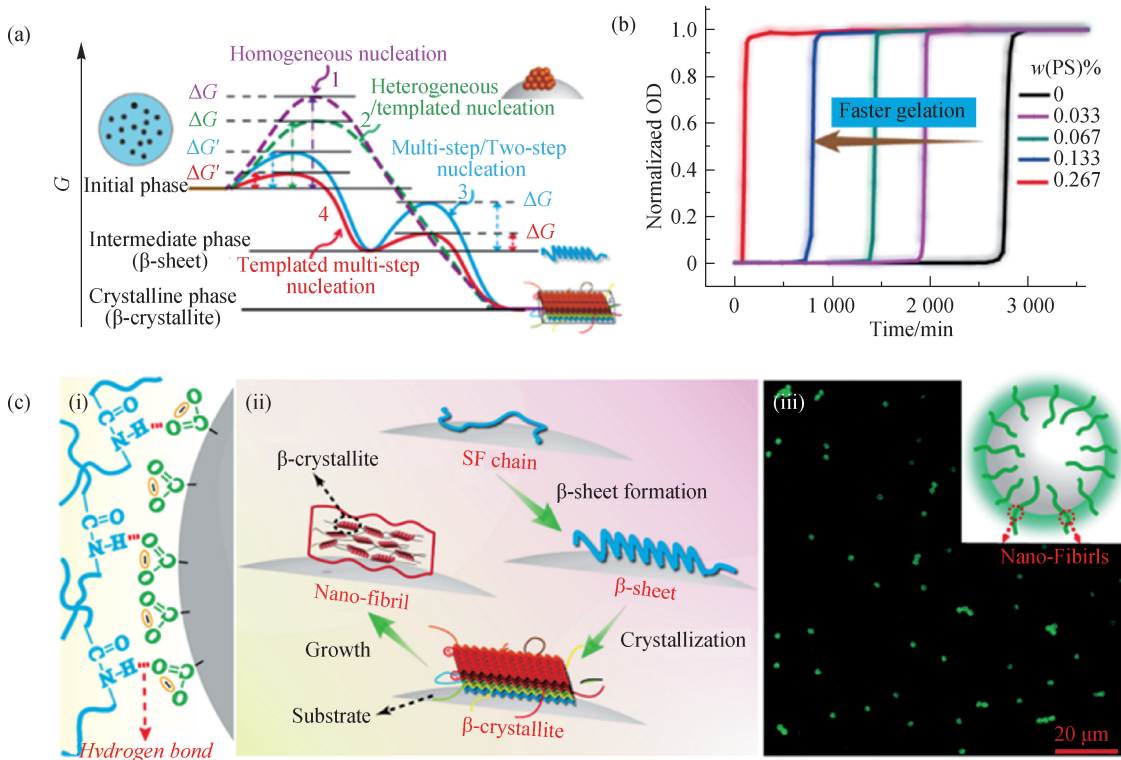


图 4 不同成核路径示意图(a),及聚苯乙烯(PS)纳米颗粒对丝蛋白分子成核与结晶的影响(b~c)^[34]

Fig. 4 Schema of various nucleation paths (a), effect of polystyrene (PS) nanoparticles on the nucleation and crystallization of silk fibroin (b-c)^[34]

出极好的弹性^[38]. 羊毛角蛋白的内禀属性决定了其链段之间的相对运动所引起的摩擦及能量损耗低, 而又由于羊毛角蛋白富含 α -螺旋结构(形似弹簧, 称为分子弹簧), 通过结构重构, 蛋白内部大量的分子弹簧交联形成凝胶网络结构; 由于其内部结构的特殊性, 该分子弹簧三维网络具有超低的有效弹性模量^[38]. 因此, 角蛋白凝胶网络对力很敏感, 在较小的压应力下可以产生相对较大的形变. 且网络结构非常稳定表现出极好的回复性: 当有外力施加时, 分子弹簧可以很好地将外力储存; 当外力撤去时, 分子弹簧将储存的能量完全的释放, 恢复原来的网络结构(图 5)^[38]. 结合光刻技术, 研究人员成功制备出各种图形的高精度蛋白质微结构. 在整个光刻过程, 仅使用水作为溶剂

和显影剂, 这与传统光刻形成鲜明对比, 具有相当大的环境和安全效益^[37,39]. 类似地, 本团队也可利用软光刻法得到表面微结构完整度很高的角蛋白膜^[40]. 在此基础上还设计制备了周期性的蛋白微结构, 根据光栅方程, 在宏观上可以观察到虹彩效应, 拓展了其在软光学上的应用^[37].

1.4 聚合物与类聚合物体系的结构与性质关联

1.4.1 聚合物复合体系的计算模拟研究

聚合物复合体系的研究是近几十年来高分子领域的前沿热点. 纳米颗粒对聚合物链的吸附能够被用来实现不同高分子链之间的强且快速黏附, 以增强增多高分子链之间的非共价物理交联. 本团队在聚合物复合体系

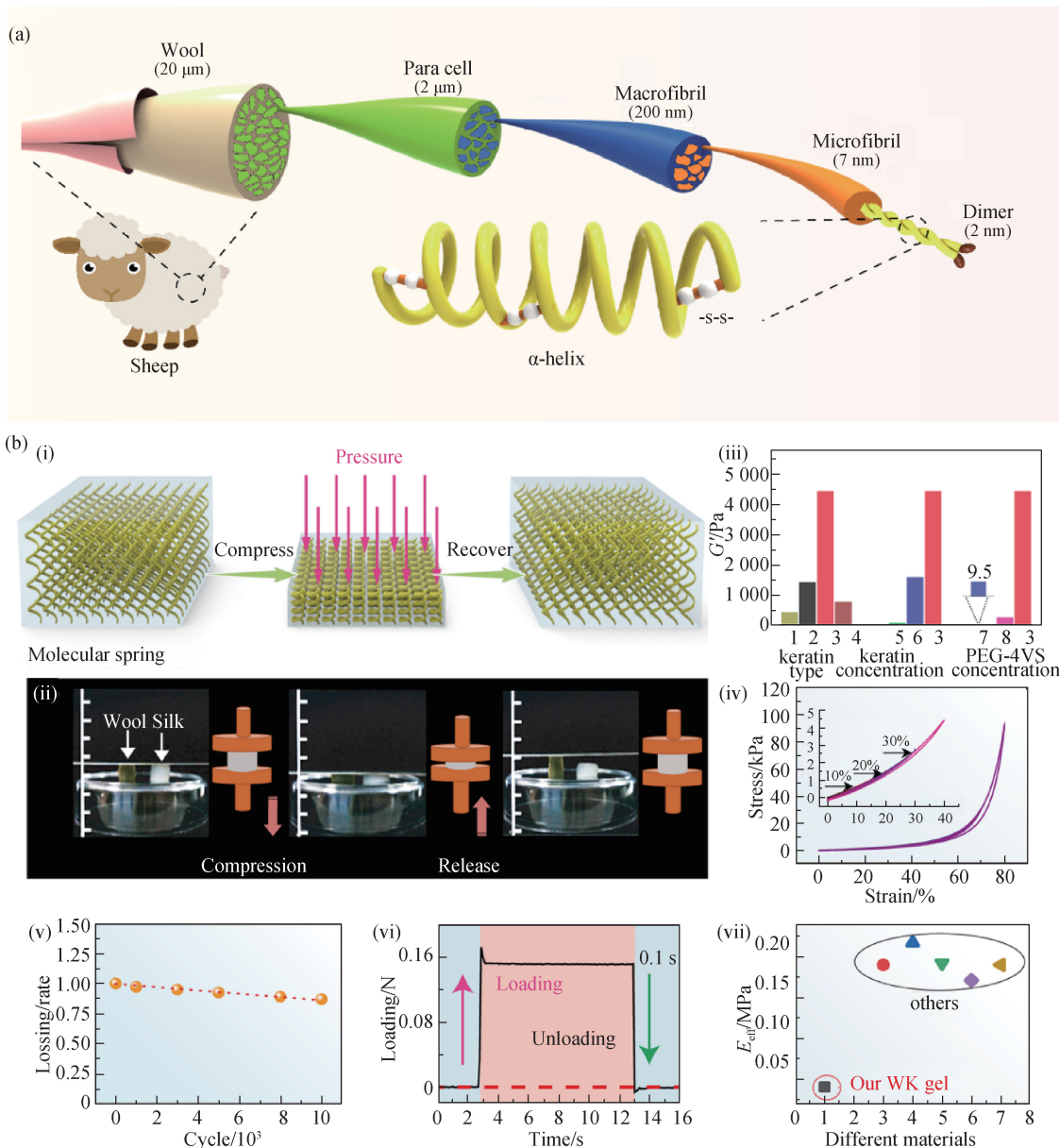


图 5 羊毛角蛋白软物质的多级结构(a),羊毛角蛋白凝胶的力学性质(b)^[38]

Fig. 5 Schematic illustration of the hierarchical structures of awool fiber (a),mechanical properties of wool keratin (wk) gels (b)^[38]

中设计嵌入瞬态网络为仿生功能材料的发展和工业应用提供了一个全新方向^[41-42]. 瞬态聚合物网络的拓扑结构随着时间的发展而动态松弛演化,这使得处于拉伸中聚合物复合体系能够通过结构演化来实现应力释放. 本团队利用理论与模拟设计了具有双网络结构的聚

合物复合体系,并测量了处于不同应变率下的双聚合物复合体系网络的应力-应变关系曲线(图 6)^[41-42]. 瞬态网络的嵌入有利于在高应变率下能量的耗散,进而防止整个体系的拉伸破裂,而永久网络在低应变率下保持复合材料的结构完整性与自修复弹性.

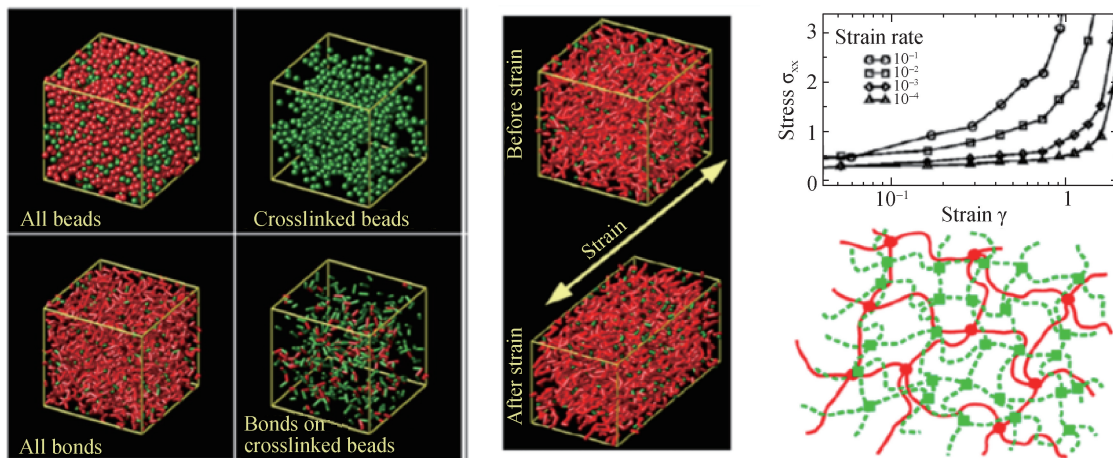


图 6 高强高韧的瞬态与永久双聚合物网络的模拟构建^[41-42]

Fig. 6 Modeling construction of strong mechanical strength and high toughness double-polymer consisted of transient and permanent networks^[41-42]

1.4.2 类聚合物的组装特性

聚合物是软物质领域中典型研究对象,如何将聚合物的柔性脆性无机材料融合为一体,获得既有柔性又有无机材料的光电热等性质的新材料,一直以来都是一个挑战. 本团队发现,对于无机一维纳米线,当其直径小于 5 nm 时,其形貌及尺度都与线性聚合物十分类似. 因此,这些超细一维材料表现出类似聚合物的性质,即特别的流变学性质和自组装性质,尤其是其尺寸结构与线性聚合物的类似特性赋予了超细无机纳米线的柔性,可以大大拓展无机纳米线在柔性功能器件中的应用. 本团队以超细金纳米线为例,当其长度远小于其临界长度时,纳米线在溶液相中显现出与胶体纳米粒子一样的组装行为^[43]. 随着长度的增加,纳米线的类聚合物组装特性越来越明显,当其长度超过一定范围,纳米线显现出完全的聚合物组装特性. 在溶液相中,在界面张力(一般为两亲作用)和纳米线自身的韧性作用下,纳米线可以组装成不同的形貌,如纳米环等^[44-45]. 因此,以超细无机纳米线为结构单元,构建功能纳米器件,可以将无机纳米材料的光、电、磁等特性与聚合物的柔性结合在一体,得到柔性功能的纳米器件.

2 生命体系及生物界面研究

根据软物质的定义,生命体系是最具有代表性且

最为复杂的软物质系统. 本团队另一主要研究方向是生物物理交叉学科的理论和实验研究,已在细胞信号网络、生物神经系统、免疫系统和癌细胞动力学理论、生物表界面等方面进行了一系列研究.

2.1 凋亡体组装途径建模

凋亡体的形成被认为是内途径细胞凋亡发生的关键事件. 当细胞受到凋亡刺激时,位于线粒体膜间隙的细胞色素 c(cytochrome c)被释放到细胞质中,与单体形式的凋亡蛋白酶活化因子 1(Apaf-1)结合,引起 Apaf-1 构象改变,随后在 ATP 或 dATP 的参与下,7 个 Apaf-1 · cytochrome c 复合物(AC)组装成“车轮状”的凋亡体. 凋亡体形成后引发 caspase 级联反应,最终导致细胞凋亡. 为了揭示凋亡体形成的分子机制,生物学家进行了大量系统、深入的研究,阐明了凋亡体的组成成分、三维结构以及凋亡体如何介导 caspase-9 激活等基本问题. 关于 7 个 AC 复合物如何一步步地组装成凋亡体这一问题却鲜有研究. 为此,本团队构建了一个生物物理模型,结合当前有关凋亡体形成的生物化学知识,提出从一个 AC 单体组装成七聚体的凋亡体有 11 条基本路径,并穷举了由它们任意组合而成的 2 047 种组装途径^[46]. 通过数学分析和数值模拟,发现了两条最受细胞青睐的基本路径,并结合实验观测结果,综合考虑转化效率和速度两项指标,最终找到 52 种最优组装

途径^[46].

2.2 细胞信号网络与生物神经系统

钙离子作为重要的胞内信号,控制着多种细胞功能,特别是当细胞内钙离子浓度很高时,会导致细胞的凋亡,因此如何控制钙离子浓度在适当幅度内,成为一个重要的调控机制.本团队用二维模型讨论钙离子信号振荡动力学,其中肌醇 1,4,5-三磷酸受体通道在内质网膜上成簇分布,形成钙离子振荡扩散波^[47].数值模拟表明,随着钙离子扩散系数增大,也即钙离子耦合增强,集群离子通道导致的钙离子扩散波出现衰败现象,且扩散波的衰败行为与钙离子通道是否为确定性动力学系统无关.本团队认为,在具有局域化可激发区域的非均匀扩散系统中,扩散波衰败行为是一个普适的行为^[47],预测该扩散波衰败行为在细胞钙离子信号系统中对钙离子浓度振荡幅度具有调控作用^[47].

此外,本团队研究了在无标度和小世界神经网络中电和化学自突触对信号传输的影响,其中外部双频信号作为信号刺激引入到一个神经元中,而对网络中神经元考虑 3 种类型的自突触连接:电性、兴奋性和抑制性.多频混合信号是外部环境对神经网络的一种重要刺激类型,神经网络对刺激信号的编码检测机制可以通过振动共振来理解.本团队的研究表明,适度的高频信号可以放大神经系统对低频信号的响应,抑制性自突触在检测神经网络的微弱信号中起着重要作用;观察到抑制性自突触可以通过振动共振显著增强信号传播,而电性和兴奋性自突触通常会减弱信号传输,这表明抑制性自突触更有利于将刺激信号的信息传递到整个网络^[48].这些发现有助于人们对自发性神经系统信号检测和信息处理的理解,抑制性自突触增强的振动共振行为可能为具有自反馈的生物系统动力学的理解提供更多的启示.

2.3 免疫系统和癌细胞动力学理论

2.3.1 具有表皮生长因子受体(EGFR)突变的肺鳞状细胞癌的临床和影像学特征

为分析 EGFR 突变的分布,本团队研究了大量肺鳞状细胞癌患者的临床和影像学特征,评估具有 EGFR 突变的肺鳞状细胞癌患者的临床和影像学特征与临床结果之间的相关性.对 2013 年 2 月至 2017 年 12 月切除的 2 322 例肺鳞状细胞癌患者的肿瘤形态和免疫组化数据进行了回顾性研究,得到 EGFR 突变的分布以及患者的临床和影像学特征,并使用单变量和多变量分析评估了 EGFR 突变状态与临床结果

之间的相关性.研究指出,女性、无烟习惯、肿瘤形态不规则且具有标记针刺可能预示着肺鳞状细胞癌中 EGFR 突变的存在^[49].本团队认为,根据 EGFR 突变的临床和影像学特征筛选出的具有 EGFR 突变的肺鳞状细胞癌患者,对其施用酪氨酸激酶抑制剂,可能会导致对阿法替尼有更高的敏感性^[49].

2.3.2 非小细胞肺癌中 EGFR T790M 突变与常见 EGFR 激活突变并存的不良预后

EGFR 20 号外显子上的点突变(T790M)和插入突变(20-ins)均对 EGFR-酪氨酸激酶抑制剂耐药,属于耐药突变.目前的研究尚未完全阐明 EGFR-T790M 耐药突变与肺腺癌患者影像学特征及临床预后的关系.对 2013 年 1 月至 2017 年 12 月在上海市肺科医院胸外科术后非小细胞的肺癌患者进行研究,统计其接受基因检测的 EGFR-T790M 突变情况,并分析突变情况与肺腺癌患者影像学特征及临床预后的相关性^[50].研究表明,EGFR-T790M 突变的患者具有比较独特的影像学特征,与 EGFR-T790M 共突变能够缩短 EGFR 主要药敏突变患者的无进展生存期,并促进 EGFR 主要药敏突变患者的远处转移,因此,EGFR-T790M 突变与肺腺癌患者预后不良相关^[50].

2.4 生物界面研究

生物医用材料植入体内后,会发生一系列复杂的过程,包括小分子的吸附、蛋白吸附、细胞黏附、基质沉积、纤维体的包裹等.这个复杂的表界面过程不仅与植入体的性质有关,还与材料表面的物理化学性质有关,包括材料的表面成分、形貌、润湿性、带电性、表面能等.深入分析材料的结构性质有助于更好地理解材料的生物学响应机制.

以二氧化钛纳米管为例,纳米管的管径、晶型、润湿性等都被证明会影响细胞和蛋白的响应,但由于纳米管的性质可变,其中对于晶型和管径效应的研究仍不完整.本团队用相同的无定型二氧化钛纳米管经过简单的马弗炉退火与火焰退火结合,获得了完整的锐钛矿和金红石的纳米管,并研究了二氧化钛纳米管的晶型对蛋白和细胞响应的影响^[51].蛋白吸附实验结果表明牛血清白蛋白和胎牛血清蛋白在金红石晶型的二氧化钛纳米管的吸附明显高于无定型纳米管,而锐钛矿和混晶表面的吸附与无定型相比没有明显的区别;纤连蛋白和胶原蛋白在金红石晶型的二氧化钛纳米管表面的吸附量最高,而锐钛矿和混晶表面的吸附却相对于无定型有所降低^[51].通过考察不同晶型表面

的润湿性、电荷、羟基和粗糙度,本团队发现材料表面不同的性质对蛋白吸附的影响规律不同,蛋白吸附的结果是材料不同性质间协同作用的效果,而吸附的蛋白进一步影响了细胞的黏附、增殖和分化^[51].本团队还通过制备大梯度二氧化钛纳米管微图案(管径范围 30~350 nm)来进一步全面研究管径和晶型对细胞的影响,结果表明小管径更有利于细胞的黏附、增殖和分化,且这一规律对无煅烧或经过高温 450 °C 煅烧的样品也适用,进一步说明晶型对细胞的影响并不明显^[52].此外,本团队在二氧化钛纳米管表面设计并制备了尺寸梯度变化的纳米银颗粒,并将其应用于纳米银颗粒抑菌机理研究^[53].

3 柔性电子器件

柔性电子器件作为软物质的一个重要应用方向,本团队也在该方向上开展了一系列研究.

3.1 柔性传感器

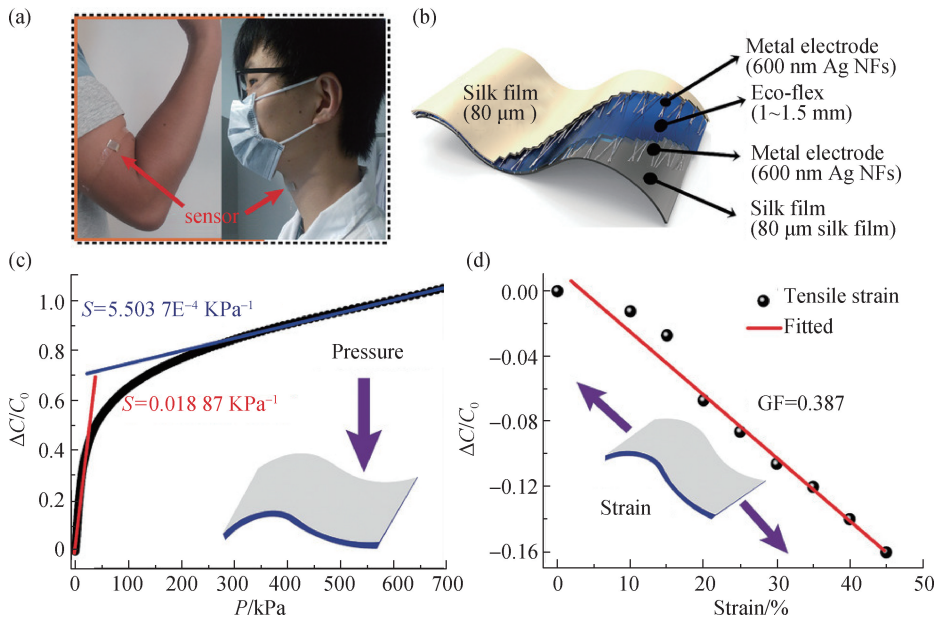
3.1.1 丝素蛋白基柔性传感器

本团队提出羟基的网链状高分子化合物可大幅度促进再生丝素蛋白 β 折叠的形成;首次从分子角度揭示了羟基基团在丝素蛋白从 α 螺旋到 β 折叠结构转变中起到的作用.基于此,通过介观掺杂的方法制备出可耐高温(>160 °C)的丝素蛋白复合膜^[54].由于该

复合膜耐热性能的提升,传统的微加工技术可在蚕丝蛋白衬底上进行电路的印刷(需较高温后处理),这将克服蛋白质柔性材料难以兼容传统加工工艺的难点,大大拓宽其在柔性电子器件方面的应用.在此基础上,本团队开发了一种高度可拉伸、透明、柔韧、低弹性模量的丝素蛋白薄膜,可舒适地黏附在皮肤上,不产生排斥反应^[55].此外,通过静电纺丝与转移技术将这种薄膜与银纳米纤维结合,制备了一种柔性/可拉伸的丝素基银纳米纤维导电电极.基于此,进一步制备出兼具压力和应变的柔性电容式传感器(图 7)^[55].它不仅具有广泛的压力和应变的监测范围,还具有良好的透气/透水性和生物相容性,因此可贴在皮肤上长期使用.

3.1.2 蚕丝纤维传感器

本团队在蚕丝纤维传感器方面的工作主要可以概括为 3 个方面:蚕丝纤维可编织传感器、全织物传感器和自供电织物传感器.如图 8 所示:本团队将银纳米线与碳纳米管同时附着于蚕丝纤维的表面作为导电与传感材料;然后通过纺丝技术将蚕丝进行编织,制备出可以同时检测人体压力和温度分布的可穿戴电子织物(E-textile)^[56].该传感器拥有高的灵敏度($S(0\sim 4$ kPa 内, $S=0.136$ kPa⁻¹),低的响应时间(0.25 s)和良好的稳定性(大于 5 000 次循环)^[56].在此基础上,本团队进一步研究了全织物的蚕丝基压力



(a) 丝素蛋白基传感器用于健康监测示意图; (b) 传感器三明治结构示意图; (c) 施加压力与电容变化率的关系,其中 S 表示灵敏度; (d) 施加拉力与电容变化率的关系,其中 GF 表示.

图 7 基于丝素蛋白的压力/拉伸传感器^[55]

Fig. 7 Silk-fibroin-based pressure/stretch sensor^[55]

传感器,通过构筑间隔织物作为弹性体介电层,实现了全织物的电子皮肤,可用于人体的运动与健康检测^[57].同时,本团队还首次在器件表面编织电感线圈,将感应电感线圈与传感器进行集成,制备出 LC 谐振式无源传感器,实现压力的无线检测.近期本团队通过连续电纺丝的方法,可控地研制出超柔超细的导电耐温纤维,开发出单电极的耐温纤维状摩擦纳米发电机;在实现能量收集的同时,其还可作为动态力检测的自驱动传感器,实现微小振动的超灵敏检测以及无源的火灾救援与定位^[58-59].

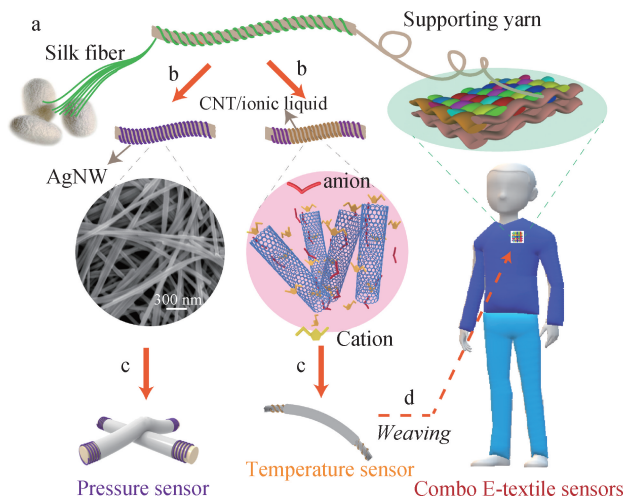


图 8 基于蚕丝纤维的可编织传感器用于人体运动及温度的检测^[56]

Fig. 8 A wearable sensor based on silk fibers is used for the detection of human movement and temperature^[56]

3.1.3 羊毛角蛋白基压力传感器

如 1.3.3 小节所提,本团队所设计的羊毛角蛋白基三维分子弹簧凝胶网络具有极好的弹性、高抗疲劳性、快速的自恢复能力及压力敏感性等.这些特性使得羊毛凝胶网络在柔性电子领域具有广泛的应用前景,如将该凝胶作为介电层夹在两个不锈钢箔之间,可以构建一个灵活而直接的应变传感器^[38].在外部应力的存在下,羊毛角蛋白凝胶介电层急剧变形,导致可检测的电阻下降或电容增加;而应力释放后,三维分子弹簧网络能够迅速恢复到初始状态^[38].基于此角蛋白凝胶的压力传感器可快速、灵敏且稳定地监测人体脉搏的波形、声音等高频生理信号,以及手指或手臂弯曲等大幅度的低频活动^[38].此外,信号检测范围与所设计网络的拓扑结构(纠缠交联密度和网络连接密度)息息相关,通过控制拓扑结构可以满足不同场景下压力检测的需求^[38].

3.2 柔性功能纳米器件

3.2.1 超细纳米线基复合器件

基于其类聚合物特性,本团队将经典的聚合物组装方法-呼吸图案法应用到超级无机纳米线的组装,实现了不同的超细无机纳米线在柔性基底(如 PET 等)的组装,获得了不同的功能纳米器件.如:超细金纳米线可以在柔性的 PET 上组装成规则的六方密堆积的蜂窝状薄膜^[60].得益于贵金属金的良好导电性、六方密堆积结构的超稳定性、多孔结构的高透光性以及超细纳米线的柔性,制备的超细金纳米线薄膜在柔性透明导电薄膜上体现出巨大的应用潜力.此外,本团队还制备了超细氧化钨纳米线蜂窝状薄膜^[61].氧化钨材料有着非常好的电致变色性能,而蜂窝状结构使得其变色可调窗口大且结构稳定,因此所制备的薄膜在柔性电子变色纳米器件有着非常广阔的应用潜力.除了呼吸图案法外,本团队还尝试了其他经典的聚合物组装方法,如冷冻干燥法^[62].超细金纳米线在冷冻干燥的过程中可以在冰-水界面之间诱导组装,形成多孔薄膜结构.此薄膜结构也在柔性透明导电膜上有着很好的应用潜力.将刚性的无机材料与柔性的有机材料结合为一体,大大拓展了制备柔性功能纳米器件的思路.在超细纳米材料领域,除了一维纳米线外,二维超薄纳米片结构,鉴于其在某一尺度上的超细特性,同样也有可能显现出其类聚合物特性.结合其优越的光、电、磁等特性^[63],二维超薄纳米片有望在柔性功能纳米器件领域形成一个新的研究热点.

3.2.2 金属硫化物基柔性可穿戴器件

本团队基于多种金属硫化物纳米材料,通过形貌调控、复合协同效应和界面工程策略增强电极电化学反应动力学,并从法拉第反应机理出发,揭示电极表面相互作用,系统探讨电极表面法拉第电荷储存行为的影响因素,有效协同电极的赝电容和类电池扩散控制行为,发展高性能、长寿命和强机械稳定性的可穿戴电化学储能装置^[64-68].如硫化物薄膜作为活性电极材料,组装得到的柔性固态电化学储能器件在电荷存储性能、柔韧性以及稳定性方面都具有良好的表现,在可穿戴领域具有可期的应用潜力^[65-67].另外,本团队发现不同硫化物材料的电化学反应特性存在较大的差别,对于 $\text{NiCo}_2\text{S}_4 @ \text{MgS}$ 和 $\text{Co}_9\text{S}_8 @ \text{NiCo}_2\text{S}_4$ 两种不同复合硫化物电极,两者的微观结构相似,但电化学循环伏安扫描曲线和恒电流充放电曲线存在明显区别,前者显示比较明显的赝电容行为,而后者则有清晰的氧化还原峰和充放电平台,表现出类电池行

为特征^[65,67]. 因此,今后有必要对它们的储能机制进行深入探讨,充分理解硫化物材料的储能行为规律,为优秀电极材料的筛选提供理论指导.

4 总结与展望

厦门大学软物质团队经过 20 年发展融合,已形成了独具特色的软物质领域研究群体,旨在提升我校在软凝聚态物理及交叉领域的核心竞争力和研究地位. 本团队研究主要集中在软物质的结构、性质、功能化及其应用研究,包括软物质结构形成机制、结构重构及介观功能化、结构性质的相关性、生物仿生材料和智能材料设计,以及柔性电子、能源器件应用. 同时,本团队也相信将柔性器件与物联网、云通讯、大数据、人工智能等技术相结合,未来在实现智慧医疗、智慧养老、智慧家庭、智慧生活上定大有可为.

致谢:对厦门大学软物质团队成员黄巧玲、叶美丹、徐俊、许清池、林昶旭和马锐对本综述写作和修改做出的贡献表示感谢.

参考文献:

[1] DE GENNES P G. Soft matter (Nobel lecture) [J]. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 1992,31(7):842-845.

[2] HOLYST R. Some features of soft matter systems[J]. *Soft Matter*, 2005,1(5):329-333.

[3] DU X W, ZHOU J, SHI J F, et al. Supramolecular hydrogelators and hydrogels; from soft matter to molecular biomaterials[J]. *Chemical Reviews*, 2015, 115(24):13165-13307.

[4] ARAKI T, BUSCAGLIA M, BELLINI T, et al. Memory and topological frustration in nematic liquid crystals confined in porous materials[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(4):303-309.

[5] COMISKEY B, ALBERT J D, YOSHIZAWA H, et al. An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays[J]. *Nature*, 1998,394(6690):253-255.

[6] XIAO K, CHEN X, CAO X Z, et al. Field-triggered vertical positional transition of a microparticle suspended in a nematic liquid crystal cell[J]. *Physical Review E*, 2020,101(5):10.

[7] XIAO K, CHEN X, WU CX. Fréedericksz-like positional transition[J]. *Physical Review Research*, 2019,1(3):033041.

[8] MOORE E B, MOLINERO V. Structural transformation in supercooled water controls the crystallization rate of

ice[J]. *Nature*, 2011,479(7374):506-509.

[9] LUPI L, HUDAIT A, PETERS B, et al. Role of stacking disorder in ice nucleation[J]. *Nature*, 2017, 551(7679):218.

[10] MA R, CAO D, ZHU C, et al. Atomic imaging of the edge structure and growth of a two-dimensional hexagonal ice[J]. *Nature*, 2020,577(7788):60-63.

[11] BAI G, GAO D, LIU Z, et al. Probing the critical nucleus size for ice formation with graphene oxide nanosheets [J]. *Nature*, 2019,576(7787):437-441.

[12] NIU H, YANG Y I, PARRINELLO M. Temperature dependence of homogeneous nucleation in ice[J]. *Physical Review Letters*, 2019,122(24):245501.

[13] LIU X Y, DU N. Zero-sized effect of nano-particles and inverse homogeneous nucleation-Principles of freezing and antifreeze[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2004, 279(7):6124-6131.

[14] SANZ E, VEGA C, ESPINOSA J R, et al. Homogeneous ice nucleation at moderate supercooling from molecular simulation[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013,135(40):15008-15017.

[15] LIU Z, SHAO C, JIN B, et al. Crosslinking ionic oligomers as conformable precursors to calcium carbonate [J]. *Nature*, 2019,574(7778):394-398.

[16] LIU Z, ZHANG Z, WANG Z, et al. Shape-preserving amorphous-to-crystalline transformation of CaCO revealed by *in situ* TEM[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020,117(7):3397-3404.

[17] SHAO C, JIN B, MU Z, et al. Repair of tooth enamel by a biomimetic mineralization frontier ensuring epitaxial growth[J]. *Science Advances*, 2019,5(8):9569.

[18] LU Z, LIU M, GAO Q, et al. Design of heterogeneous nuclei composed of uniaxial cellulose nanocrystal assemblies for epitaxial growth of poly(ϵ -caprolactone) [J]. *Macromolecules*, 2017,50(8):3355-3364.

[19] NING D, LIU X Y. Controlled ice nucleation in micro-sized water droplet[J]. *Applied Physics Letters*, 2002,81(3):445-447.

[20] ZHANG Z, LIU XY. Control of ice nucleation; freezing and antifreeze strategies[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018,47(18):7116-7139.

[21] MASLIN M, OWEN M, BETTS R, et al. Gas hydrates: past and future geohazard? [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A; Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2010,368(1919):2369-2393.

[22] NING F, YU Y, KJELSTRUP S, et al. Mechanical properties of clathrate hydrates; status and perspectives[J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, 5(5):6779-

- 6795.
- [23] LAMBECK K, ESAT T M, POTTER E K. Links between climate and sea levels for the past three million years[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 199-206.
- [24] XU W Y, LOWELL R P, PELTZER E T. Effect of seafloor temperature and pressure variations on methane flux from a gas hydrate layer: comparison between current and late Paleocene climate conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B11): 26413-26423.
- [25] CAO P, WU J, ZHANG Z, et al. Mechanical properties of methane hydrate: intrinsic differences from ice[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(51): 29081-29093.
- [26] CAO P Q, WU J Y, ZHANG Z S, et al. Mechanical properties of bi- and poly-crystalline ice[J]. *Aip Advances*, 2018, 8(12): 22.
- [27] CAO P, NING F, WU J, et al. Mechanical response of nanocrystalline ice-contained methane hydrates: key role of water ice[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(12): 14016-14028.
- [28] LI Y, SONG Y, LIU W, et al. Experimental research on the mechanical properties of methane hydrate-ice mixtures[J]. *Energies*, 2012, 5(2): 181-192.
- [29] CHEN H, CHANDRASEKAR S, SHEETZ M P, et al. Mechanical perturbation of filamin A immunoglobulin repeats 20-21 reveals potential non-equilibrium mechanical partner binding function[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1642.
- [30] CHEN H, ZHU X, CONG P, et al. Differential mechanical stability of filamin A rod segments [J]. *Biophysical Journal*, 2011, 101(5): 1231-1237.
- [31] CHEN H, FU H, ZHU X, et al. Improved high-force magnetic tweezers for stretching and refolding of proteins and short DNA[J]. *Biophysical Journal*, 2011, 100(2): 517-523.
- [32] YUAN G, LE S, YAO M, et al. Elasticity of the transition state leading to an unexpected mechanical stabilization of titin immunoglobulin domains[J]. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 2017, 56(20): 5490-5493.
- [33] CHEN H, YUAN G, WINARDHI R S, et al. Dynamics of equilibrium folding and unfolding transitions of titin immunoglobulin domain under constant forces[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(10): 3540-3546.
- [34] CHEN Z, ZHANG H, LIN Z, et al. Programming performance of silk fibroin materials by controlled nucleation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(48): 8978-8990.
- [35] SHAVANDI A, SILVA T H, BEKHIT A A, et al. Keratin: dissolution, extraction and biomedical application [J]. *Biomaterials Science*, 2017, 5(9): 1699-1735.
- [36] EDER M, AMINI S, FRATZL P. Biological composites-complex structures for functional diversity[J]. *Science*, 2018, 362: 543-547.
- [37] ZHU S, ZENG W, MENG Z, et al. Using wool keratin as a basic resist material to fabricate precise protein patterns[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(28): 1900870.
- [38] ZHANG L, HU F, ZHU S, et al. Meso-reconstruction of wool keratin 3D "molecular springs" for tunable ultra-sensitive and highly recovery strain sensors[J]. *Small*, 2020, 16(24): 2000128.
- [39] ZENG W, YU D, TANG Y, et al. Wool Keratin photolithography as an eco-friendly route to fabricate protein microarchitectures [J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2020, 3(5): 2891-2896.
- [40] ZHU S, LUO W, ZENG W, et al. Preparation of free-standing micropatterned keratin films by soft lithography [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2019, 77(6): 533-538.
- [41] CAO X Z, MERLITZ H, WU C X. Tuning adsorption duration to control the diffusion of a nanoparticle in adsorbing polymers[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2017, 8(12): 2629-2633.
- [42] CAO X Z, MERLITZ H, WU C X. Mechanical strength management of polymer composites through tuning transient networks[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2020, 11(3): 710-715.
- [43] CHEN Y, WANG Y, PENG J, et al. Assembly of ultrathin gold nanowires: from polymer analogue to colloidal block [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(3): 2756-2763.
- [44] XU J, WANG H, LIU C, et al. Mechanical nanosprings: induced coiling and uncoiling of ultrathin Au nanowires [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(34): 11920-11922.
- [45] XU J, WANG Y, QI X, et al. Preservation of lattice orientation in coalescing imperfectly aligned gold nanowires by a zipper mechanism[J]. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 2013, 52(23): 6019-6023.
- [46] QI H, JIANG Y, YIN Z, et al. Optimal pathways for the assembly of the Apaf-1 • cytochrome c complex into apoptosome[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2018, 20(3): 1964-1973.
- [47] LI X, WU Y, GAO X, et al. Wave failure at strong

- coupling in intracellular Ca^{2+} signaling system with clustered channels[J]. *Physical Review E*, 2018, 97(1):012406.
- [48] YAO C, HE Z, NAKANO T, et al. Inhibitory-autapse-enhanced signal transmission in neural networks[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 97(2):1425-1437.
- [49] GAO X J, ZHAO Y F, BAO Y, et al. Poor prognosis with coexistence of EGFR T790M mutation and common EGFR-activating mutation in non-small cell lung cancer [J]. *Cancer Management and Research*, 2019, 11:9621-9630.
- [50] GAO X J, ZHU J J, CHEN L S, et al. Clinical and imageological features of lung squamous cell carcinoma with EGFR mutations [J]. *Cancer Management and Research*, 2019, 11:9017-9024.
- [51] LI Y, DONG Y, ZHANG Y, et al. Synergistic effect of crystalline phase on protein adsorption and cell behaviors on TiO_2 nanotubes[J]. *Applied Nanoscience*, 2020, 10:3245-3257.
- [52] LI Y, WANG S, DONG Y, et al. Effect of size and crystalline phase of TiO_2 nanotubes on cell behaviors: a high throughput study using gradient TiO_2 nanotubes [J]. *Bioactive Materials*, 2020, 5(4):1062-1070.
- [53] LI Y, DONG Y, YANG Y, et al. Rational design of silver gradient for studying size effect of silver nanoparticles on contact killing[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2019, 5(2):425-431.
- [54] HUANG J, XU Z, QIU W, et al. Stretchable and heat-resistant protein-based electronic skin for human thermoregulation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(13):1910547.
- [55] HOU C, XU Z, QIU W, et al. A biodegradable and stretchable protein-based sensor as artificial electronic skin for human motion detection [J]. *Small*, 2019, 15(11):1805084.
- [56] WU R, MA L, HOU C, et al. Silk composite electronic textile sensor for high space precision 2D combo temperature-pressure sensing[J]. *Small*, 2019, 15(31):1901558.
- [57] WU R, MA L, PATIL A, et al. All-textile electronic skin enabled by highly elastic spacer fabric and conductive fibers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(36):33336-33346.
- [58] MA L, ZHOU M, WU R, et al. Continuous and scalable manufacture of hybridized nano-micro triboelectric yarns for energy harvesting and signal sensing[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(4):4716-4726.
- [59] MA L, WU R, LIU S, et al. A machine-fabricated 3D honeycomb-structured flame-retardant triboelectric fabric for fire escape and rescue[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(38):2003897.
- [60] HE Y, CHEN Y, XU Q C, et al. Assembly of ultrathin gold nanowires into honeycomb macroporous pattern films with high transparency and conductivity[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(8):7826-7833.
- [61] XU S, LI X, OU Y, et al. Ultra-large optical modulation of a size-tunable flexible electrochromic honeycomb mesoporous tungsten oxide film[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2019, 6(3):680-686.
- [62] LI X Y, WANG H Q, XU Q C, et al. Ultrathin AuAg nanofilms from ice-templated assembly of AuAg nanowires[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(13):1800256.
- [63] LIN X M, CHEN J H, FAN J J, et al. Synthesis and operando sodiation mechanistic study of nitrogen-doped porous carbon coated bimetallic sulfide hollow nanocubes as advanced sodium ion battery anode[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(40):1902312.
- [64] LIU Q, HONG X, ZHANG X, et al. Hierarchical Cu_2S nanorods with different crystal phases for asymmetrical supercapacitors and visible-light photocatalysis[J]. *Dalton Transactions*, 2018, 47:15189-15196.
- [65] LIU Q, HONG X D, YOU X Y, et al. Designing heterostructured metal sulfide core-shell nanoneedle films as battery-type electrodes for hybrid supercapacitors[J]. *Energy Storage Mater*, 2020, 24:541-549.
- [66] SHAO G, YU R, ZHANG X, et al. Making stretchable hybrid supercapacitors by knitting non-stretchable metal fibers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 15(31):2003153.
- [67] ZHANG X, CHEN X, BAI T, et al. A simple route to fiber-shaped heterojunctioned nanocomposites for knittable high-performance supercapacitors[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(23):11589-11597.
- [68] HONG X, LIU Q, GAO X, et al. Rational design of coraloid Co_9S_8 -CuS Hierarchical architectures for quantum dot-sensitized solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6:11384-11391.

Structures, properties and applications of typical soft matter systems

LIN Youhui, ZHANG Zhisen, GUO Wenxi, WU Jianyang,
CAO Xuezheng, CHEN Hu, SHUAI Jianwei, WU Chenxu*

(Research Institute for Biomimetics and Soft Matter, Fujian Provincial Key Laboratory for Soft Functional Materials
Research, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The study of soft matter qualifies as a crucial component of current material science research. Unique properties and functions as well as rich physical sophistication and potential applications of soft matter have attracted research interest in various fields. As the research continues to progress, so does researchers' understanding of the basic commonality of soft matter, such as entropy-induced order. However, as of today, a unified research paradigm has not yet been established in the area of soft matter physics. In this review, we primarily summarize the recent progress in both fundamentals and applications of soft matter achieved by the soft-matter group at Xiamen University (XMU). After 20 years of developments, XMU soft-matter research has grown to a full-fledged and unique discipline. First, we discuss the correlation between structures and properties in several typical soft condensed matter systems, including liquid crystals, water and gas hydrates, protein, polymer composite systems, and polymer-like systems. Then, we summarize our recent progress in life-related soft matter systems, such as cell signal transmission and neural network system. Finally, our research results in flexible electronics and energy devices are presented.

Keywords: soft matter; dynamic mechanism; mechanical properties; flexible electronics; living system