

# 2019年微纳米力学热点回眸

江进武, 张田忠

上海大学力学与工程科学学院, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200444

**摘要** 微纳米尺度下材料的力学性能与样品的尺寸和表界面等物理量密切相关, 因此纳米材料的力学性能可以在很大范围内进行高效的调节, 使得纳米材料能够拥有超轻、超硬、以及高断裂强度和高韧性等卓越的力学性能。从尺度缺陷效应和生长机理、屈曲机理分析和应用、界面力学性能和应用、生物和软物质力学性能、软体机器人、机器学习等方面盘点了微纳米力学2019年取得的研究成果。

**关键词** 纳米材料; 尺度效应; 多场耦合; 缺陷; 屈曲; 界面; 软物质; 软体机器人; 深度学习

从20世纪80年代开始, 富勒烯<sup>[1]</sup>和碳管<sup>[2]</sup>等纳米材料相继被实验合成或者发现, 引起了学术界和工业界对零维和一维纳米材料的广泛关注和研究。21世纪初, 石墨烯的再次发现极大地推动了纳米材料的进一步发展, 特别是大量具有若干原子厚度的二维纳米材料被实验上合成出来或者理论上预测存在<sup>[3]</sup>。每种纳米材料都有自己独特的电学、光学、力学或者化学等性能, 例如从导电性角度来看, 六方氮化硼有很大的电子带隙是绝缘体, 二硫化钼是半导体, 而石墨烯是带隙为零的导体<sup>[4]</sup>。这些数量丰富的纳米材料为各种实际应用提供了巨大的选材空间。尤为重要的是这些纳米材料可以通过合适的方式组合在一起, 将每种材料的优异性能综合起来。将不同二维纳米材料堆垛在一起形成的范德华异质结构就可以同时拥有各种二维

纳米材料的优异性能, 是典型的多功能纳米器件<sup>[5]</sup>。由于纳米材料独特的性能和极其美好的应用前景, 长期以来各国政府都对纳米材料研究提供强有力的支持和投入。

纳米材料的一个基本特征是系统的尺寸在纳米尺度, 这个尺度下材料的表界面效应将对系统的力学稳定性产生重要影响, 而力学稳定性是各种光、电器件高效工作的基础。因此自纳米材料诞生以来, 国内外力学界就对它们的力学性能进行了深入的研究。此外, 在纳米尺度下材料的力学性能与电、光、热、化等各种其他性质互相耦合, 所以关于力学性能的研究也是分析纳米材料综合性能的重要一环。

纳米力学研究伴随着纳米材料的发展, 经历了多个研究阶段, 随着合成、表征、观测等实验技术的

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-01-10

作者简介: 江进武, 教授, 研究方向为固体力学、微纳米力学, 电子信箱: jiangjinwu@shu.edu.cn

引用格式: 江进武, 张田忠. 2019年微纳米力学热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 6-18; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.01.001

发展,越来越多的纳米力学现象和效应被发现而得到研究。最初,大量研究聚焦在关于纳米材料的杨氏模量和泊松比等基本力学参数、各种基本变形过程,以及通过机械应变等力学手段来调控纳米材料的各种功能;之后,是研究空位和位错等实验中常见的缺陷对力学综合性能的影响,进而通过缺陷设计来增强纳米材料的力学性能;再到后来关于多功能纳米材料的结构设计和分析,以及纳米材料中固固界面和固液界面的相关研究。纳米力学领域在最近几年取得了巨大的进展,大量反常或者奇特的现象被发现,许多奇特功能得以实现,宏观连续介质理论被进一步发展用于纳米材料,多个跨尺度力学模型也被提出来。文献[6]对2018年之前的微纳米力学研究进行了综述,关于交叉力学的最新综述见文献[7]。本文对国内外纳米力学界在2019年取得的代表性研究成果作一回顾。

## 1 尺度缺陷效应和生长机理

微纳米力学的一个基本问题是分析纳米材料的主要力学性能,特别是揭示原子尺度下一些缺陷对主要力学性能的影响,实现对力学性能的调控,最终设计出满足特定实际需求的纳米复合材料。

### 1.1 尺度效应

表界面是微纳材料的一个显著特征,表界面效应与体系的尺寸紧密联系,导致了纳米材料的力学性能对尺寸有很强的依赖性。宏观尺度下,硅和金刚石都是很脆的材料,但是最新的实验却发现在纳米尺度下硅纳米线和金刚石都可以承受很大的弹性变形<sup>[8-9]</sup>。通过表面本征应力模型可以定量地解释纳米线中杨氏模量等力学性能对直径的依赖关系<sup>[10]</sup>。研究表明在压痕实验的初始阶段(探头深度小于100 nm),弹性变形对分析硬度和位错密度都有重要作用,因此不能忽略<sup>[11]</sup>。悬空薄膜在边界处的局部吸附行为可以在压痕实验中的应力应变曲线有所体现,影响测量结果的分析<sup>[12]</sup>。在数值模拟方面,为了模拟大尺寸的碳纳米管,Ji等<sup>[13]</sup>发展了非线性粗晶模型。

### 1.2 多场耦合

Wen等<sup>[14]</sup>实验发现,通过在软物质中间加入驻电体,可以实现一种类似于挠曲电的效应,从而极大地增强软物质的等效挠曲电系数。第一性原理计算表明二硒化钒中钒原子的磁矩对屈曲导致的应变场很敏感,因此可以通过应变场来调控单层二硒化钒的电极化和磁化性能<sup>[15]</sup>。具有Janus结构的过渡金属硫化物具有较强的压电效应,并且可以通过相邻两层间的相对剪切变形对压电效应进行调节<sup>[16]</sup>。碳纳米锥在简单的单轴载荷下会产生明显的应变梯度,导致巨大的赝磁场效应<sup>[17]</sup>。剪切应变可以调控二维纳米材料中激子的动力学行为<sup>[18]</sup>。

### 1.3 缺陷和断裂

由于制备工艺的原因,缺陷在纳米材料中广泛存在,这些缺陷对材料力学性能有重要的影响。Zeng等<sup>[19]</sup>通过解析的方法分析了剪切带和界面滑移等塑性变形对固体材料断裂强度和断裂韧性的影响,沙振东等<sup>[20]</sup>的模拟结果表明金属玻璃中V形缺陷的几何参数对断裂强度和失效模式都有显著影响,赵军华研究小组分析了缺陷对二维纳米材料力学性能各向异性的调控作用<sup>[21]</sup>,从位错发展的角度出发能够分析金属在强塑性载荷下的力学行为<sup>[22]</sup>。为了理解缺陷对力学性能的影响,学者对缺陷的动力学行为进行了深入研究。由于位错对温度的依赖性,导致钢材料有一个从塑性到脆性的转变过程,并且会导致失效模式的不同<sup>[23]</sup>。最近的模拟结果表明螺旋位错能以剪切波的波速滑移,并且能够以超音速在晶体内高速移动<sup>[24]</sup>。碳钢内的梯度结构和残余应力会对裂纹扩展和裂纹尖端的塑性变形情况有显著的影响<sup>[25]</sup>。描写断裂特征的准则与样品的尺寸相关,当系统尺寸小于某个特征值时,断裂强度将取代断裂韧性成为主要的判断依据<sup>[26]</sup>。

在深入理解缺陷的动力学行为及其对力学性能影响的基础上,可通过缺陷设计来增强纳米材料的力学性能。石墨烯中通过硼原子对碳原子进行替换掺杂,可以很好地继承石墨烯的高强度和刚度;掺杂的硼原子则可通过改变裂纹扩展的方向提高石墨烯的破坏韧性<sup>[27]</sup>。利用电子隧穿显微镜可

以观测氮化硼中晶界的形成机理以及分布情况,通过晶界设计有助于合成高质量的氮化硼<sup>[28]</sup>。螺旋位错可用于生成 sp<sup>2</sup> 杂化的碳同素异形体,由于螺旋位错的独特性能,该材料可以承受高达 90% 的弹性应变<sup>[29-30]</sup>。电子隧穿显微镜观测发现,六角密排高熵合金的加载变形会激发三种位错模式,通过调节六角密排的晶格常数比值  $c/a$  系数,可以控制位错模式,获得良好的延展性<sup>[31]</sup>。模拟研究揭示了小角度的晶界结构对纳米镍薄层材料的硬度、韧性和稳定性等力学性能具有很好的调控功能,从而导致了显著的尺寸效应<sup>[32]</sup>。

#### 1.4 复合材料和结构

材料的许多力学性能之间具有排斥效应,很难同时提高多种力学性能。例如要同时实现高断裂强度和断裂韧性就很有挑战性。通过微观结构设计,最近多个实验制备了集多种优良性能于一体的多功能碳材料,这些材料能承受比较高的拉伸和压缩载荷,同时有较强的变形能力,并且密度非常小<sup>[33-34]</sup>。利用高质量的热解碳源,合成结构可调的微观单元,Zhang 等<sup>[35-36]</sup>合成了具有综合优异性能的复合纳米材料。这种材料非常轻,力学性能稳定对缺陷不敏感,并且具有很高的力学强度。通过热核分解等化学合成方法,Liang 等<sup>[37]</sup>合成了同时具有良好拉伸强度和优异可延展性的纳米复合材料,该材料包含了不规则的面心立方结构母体和大量可延展的规则纳米结构,从而兼有各种优良力学性能。有学者合成了硬软复合的碳材料,其中柔软碳材料可以抑制固态电解质界面的形成,从而保证钠离子电池容量的稳定性,因此这种碳复合材料电极具有较高的容量和稳定性<sup>[38]</sup>。石墨复合材料可以用于生产低成本的铝离子充放电电池<sup>[39]</sup>。通过焦耳热可以快速生成具有高电导的石墨烯薄片<sup>[40-41]</sup>。Pan 等<sup>[42]</sup>通过机械像素法(mechanical pixel)生成超材料结构,可以实现具有大剪切变形的超结构。在声学超结构中,利用界面的拓扑性质可以将声波局限在界面附近或者实现单向的声传播<sup>[43]</sup>。实验合成的氮化硼纳米带水凝胶在很大的温度范围内都具有超弹性<sup>[44]</sup>。碳纳米管纺线的径向弹性模量可以通过加载次数和扭曲程度来调

控<sup>[45]</sup>。具有剪纸构型的结构具有一种新的塌缩模式,能够起到吸能效果<sup>[46]</sup>。通过调整石墨烯的氧化程度和微观结构,可以实现负泊松比效应,泊松比数值可以在 -0.25~-0.55 变化<sup>[47]</sup>。研究表明嵌锂作用会降低黑磷的杨氏模量和屈服应力,从而影响黑磷的稳定性<sup>[48]</sup>。

#### 1.5 生长机理

纳米材料广泛应用的一个基本前提就是能够大规模地生长出高质量的纳米材料,因此纳米材料的生长机理是一个关键性的研究,长期得到国内外学者的密切关注。对二氧化硅衬底的羟基化,能降低衬底与石墨烯生长边界的相互作用,从而实现在介电性的衬底上由成核主导的化学气相沉积法生长高质量的石墨烯<sup>[49]</sup>。另外,金属铜中的小台阶与石墨烯生长边界有较强的结合作用,可以把已经聚集成核的小块石墨烯固定下来,从而有利于大面积地生长石墨烯<sup>[50]</sup>。通过观测石墨烯生长区域的演化情况,He 等<sup>[51]</sup>分析了碳源添加速率、边界反应动力学、和碳源的表面迁移率对石墨烯生长的影响。在六角氮化硼的化学气相沉积合成中,加入少量的硅可以转变生长机理,形成枝晶形状的氮化硼区域,从而提高氮化硼的生长质量<sup>[52]</sup>。武汉大学刘泽利用纳米塑模技术研究温度和特征尺寸对金属变形过程的影响<sup>[53]</sup>,并与合作者一起利用该技术塑造出各种具有大表面的金属和合金材料<sup>[54]</sup>。

## 2 屈曲机理分析和应用

纳米材料特别是石墨烯、二硫化钼等二维纳米材料,面内强度远大于面外抗弯刚度,容易发生面外屈曲失稳,这种屈曲过程对衬底和温度等参数非常敏感。国内外关于纳米材料屈曲失稳的研究主要集中在揭示各种物理参数对屈曲过程的影响,以及通过调整各种参数对屈曲模态进行主动调控。

### 2.1 屈曲失稳机理

在关于屈曲失稳的机理研究方面,二硫化钼薄膜与刚性基底间范德华相互作用比较弱,最近的一个实验原位地观察了该薄膜网状屈曲模态的产生和动态演化过程<sup>[55]</sup>。通过力电耦合可以分析介电

弹性薄膜的临界屈曲状态与电压之间的联系<sup>[56]</sup>。Yin等<sup>[57]</sup>的研究表明薄膜材料的各项异性和加载方式都会影响屈曲模态的形状和演化方式。Liu等<sup>[58-60]</sup>研究了受限于一个柱面内的细长杆在压缩载荷下的屈曲和后屈曲行为,通过两种不同的杆模型解析推导出屈曲后杆的压缩刚度。在薄膜屈曲模态调控方面,清华大学李博等通过周期性地改变表面刚度,实现对衬底上薄膜褶皱的结构参数(包括褶皱波长和高度)进行有效的调控<sup>[60]</sup>,放在聚合物衬底上的金属薄膜中的褶皱构型可以通过薄膜厚度和基底硬度进行有效调控<sup>[61-64]</sup>,通过SW缺陷和晶界可以对铺在金属衬底上的石墨烯褶皱进行诱导和调控<sup>[65]</sup>。单轴拉伸载荷下,薄膜一般会出现横向褶皱,徐帆等研究了曲率和各向异性等效应对这类横向褶皱的影响,发现当薄膜的曲率足够大时,单轴拉伸下不会出现横向的褶皱<sup>[66-67]</sup>。在弯曲载荷下,多层石墨烯会发生剪切、屈曲、拐弯等破坏模式,并且这些破坏模式的出现与否还与系统的几何尺寸密切相关<sup>[68]</sup>。

二维纳米材料的屈曲现象可以用于测量材料的一些基本力学性能,例如最近的鼓泡实验测量了多层二维纳米材料(包括石墨烯、二硫化钼和氮化硼)的杨氏模量和弯曲刚度,实验结果表明层间范德华相互作用中的剪切能对这类结构的弯曲刚度有重要的影响<sup>[69]</sup>。过渡金属氧化物具有准二维特性,可以利用乙醇液滴将其卷起来,实现一种有趣的纳米卷结构<sup>[70]</sup>。

## 2.2 屈曲失稳的应用:柔性电子器件

屈曲失稳可以将二维薄膜结构转变成三维的柔性结构,因此在柔性电子器件方面得到了不少应用。通过屈曲可以引导材料自组装形成结构复杂的三维多功能电子器件,该方法适用于从微观到宏观的各种尺度。最近的研究表明通过不同的材料或者物理效应可以优化屈曲诱导的自组装三维柔性电子器件,包括利用介电弹性体驱动更好地实现力电驱动下的三维自组装<sup>[71]</sup>,用剪纸艺术<sup>[72]</sup>或者形状记忆效应<sup>[73]</sup>来实现自组装。目前的技术也可以通过屈曲诱导自组装控制硬的无机电子器件与柔软基底间的结合<sup>[74-75]</sup>。通过引入扭曲的变形模式,

可以在自组装三维结构中进一步引入新的力学性能<sup>[76]</sup>。二维纳米条带在外加载荷下会发生屈曲形成具有各种独特性能的三维结构,Xu等通过结构优化设计来处理该过程的反问题,为三维柔性电子器件的设计提供高效手段<sup>[77-78]</sup>。银纳米线和二硫化钼复合材料具有优良柔软性和导电性能,可以用作可穿戴应变传感器,将该材料与PDMS一起制作成三明治结构,可以通过摩擦发电<sup>[79]</sup>。

## 3 界面力学性能和应用

纳米材料在实际应用中经常是以宏观尺度出现的,从纳米尺度到宏观尺度需要跨越十几个量级。在将纳米材料复合成宏观尺度时,难以避免出现各类界面,这些界面对宏观尺度下的纳米复合材料起了关键作用,界面效应甚至比纳米材料本身的性能更重要。

### 3.1 界面强度

目前有不少工作集中在研究界面强度的测量和分析,以及探索有效的手段对界面强度进行积极的调控。实验上能够把石墨烯从六方氮化硼上撕下然后贴到二硫化钼上面,通过定量测量对比发现石墨烯与六方氮化硼间结合强度小于石墨烯和二硫化钼间结合强度<sup>[80]</sup>。Zhao等<sup>[81]</sup>的研究表明粘附强度直接影响了石墨烯从衬底上撕裂下来的模式,当黏附强度较低时,石墨烯会发生一个缓慢的撕裂过程;而当黏附强度较大时,撕裂过程非常快。二维纳米材料从三维母体或者衬底上撕裂下来的过程可以用一个判据来描述,该判据综合考虑二维材料的界面性质、几何尺寸以及撕裂动力学量的影响,从而为实验中二维纳米材料的机械剥离制备方法提供理论依据<sup>[82]</sup>。在粗糙界面的结合强度方面,通常认为粗糙表面上凹凸结构间的咬合能力起到最重要的作用,不过最近研究人员发现互相接触的凹凸界面的个数对粗糙界面的结合强度也有明显的影响<sup>[83]</sup>。中国科学技术大学研究人员提出用非共价界面相互作用实现同时具有高强度和高韧性的石墨烯贝壳结构<sup>[84]</sup>,类似的相互作用也导致了氧化石墨烯和三聚氰胺间具有很强的结合能<sup>[85]</sup>。此

外,界面黏附强度和结合力还可以通过温度<sup>[86]</sup>、磁场<sup>[87]</sup>和梯度结构设计<sup>[88]</sup>等方法来进行有效调控。Zhu等<sup>[89]</sup>通过温度梯度对石墨烯界面摩擦力进行调控,实现了石墨烯环状结构的连续转动。研究发现界面黏附性能与接触电导有紧密联系,Song等<sup>[90]</sup>提出一个模型可以将界面的接触质量与界面的微观结构直接联系起来,该模型可以从微观原子角度来分析界面对接触电导的调控作用,也可分析石墨烯层间摩尔条纹对电导的影响。Zhang等对锑烯与金属探头间的界面性能进行研究<sup>[91]</sup>,而石墨烯界面的导热性能可以通过机械应变进行有效的调控<sup>[92]</sup>。

### 3.2 摩擦和超润滑

二维单原子厚度的层状材料互相堆垛在一起形成范德华异质结构,相邻两层间摩擦力与晶格间不可公度性紧密相关。实验表明石墨烯和氮化硼界面由于晶格不可公度,具有稳定的超润滑特性<sup>[93]</sup>,这类超润滑现象与界面处接触面积直接相关,并且在宏观尺度下也可以存在结构超润滑<sup>[94]</sup>。有研究表明超润滑会导致转动失稳现象<sup>[95]</sup>,超润滑现象可用于测量石墨和液体间的黏附能量<sup>[96]</sup>,也有助于设计出高效的纳米发动机<sup>[97]</sup>。关于二维纳米材料的摩擦研究和结构超润滑方面的详细介绍,可以参考相关综述文章<sup>[98-100]</sup>。通过机械应变、温度、外来颗粒等力学手段和物理方法可以改变界面性能,从而调控摩擦。机械应变能够改变两层石墨烯间的摩尔条纹,从而影响石墨烯层间摩擦<sup>[101-103]</sup>;机械应变还可以改变石墨烯的柔软性,从而调节石墨烯层间的局部钉扎能力(local pinning capability),进而实现对石墨烯间摩擦力的有效调控<sup>[104]</sup>。升温使界面上的化学基团挥发出来,从而改变界面的物理结构,影响石墨和金刚石碳界面的摩擦性能<sup>[105-106]</sup>。石墨与石墨间界面上的外来颗粒,随着摩擦次数的增加会被逐渐清除,从而导致摩擦系数的降低,因此石墨间的摩擦系数还与摩擦次数有关<sup>[107]</sup>。空气中的水蒸气在石墨烯边界处形成自由化学键,减小石墨烯与衬底间的摩擦力,所以石墨烯与衬底的摩擦与环境湿度相关<sup>[108]</sup>。此外,缺陷和光致激发也可以对二维纳米结构中层间摩擦性能起到明显的调控作用<sup>[109-110]</sup>。Li等<sup>[111]</sup>改进了界面模

型,用于描述复合材料中不同成分间的结合和摩擦性能。

### 3.3 固液界面

微纳尺度的固液界面广泛存在于生物、医药、和能源等重要领域,对固液界面力学性能的研究是深入理解许多生理反应和能源转换等过程的基础,这也是国内微纳米力学界的一个重要研究方向。在水流动方面,南京航空航天大学郭万林提出水伏学的概念,通过水在固体表面的流动来获取电能。最近的实验和模拟发现,夹在两片运动石墨烯间的水在液体表面和内部具有不同的势能,可以产生1 V左右的电压<sup>[112]</sup>。Feng和Xu的工作表明多孔石墨烯中孔的边界可以降低气液界面对水分子的束缚能,从而极大地加速水的蒸发过程<sup>[113]</sup>。受限于较粗碳纳米管内的液态水能够在长程关联下发生有序排列,并且可以通过外加点电荷来调控水分子的排序<sup>[114]</sup>,水链的重排过程还会带动周边水分子的排序,产生类似于激波的现象<sup>[115]</sup>。在用聚二甲基硅氧烷(PDMS)和氧化石墨烯混合物制作的太阳能水泵管道中,利用微通道的变形和水接触角的梯度变化可以实现水流的高速驱动<sup>[116]</sup>。低温下水滴在固体表面上的微观构型与固体表面的亲水性之间有直接的联系,仇虎等通过分子动力学模拟对该现象进行了研究<sup>[117]</sup>。此外,水模型(相互作用)的选择对各种固液界面的物理力学性能都有比较大的影响<sup>[118]</sup>。Qiao等<sup>[119]</sup>研究液滴在具有微结构表面上的滑移行为,特别是在Cassie-Baxter公式中引入一个修正因子,从而可以描写液滴接触角与表面微结构间的关系。

研究气体或者离子流体的选择性过滤有助于理解生物中一些基本输运过程。石墨烯纳米通道可以对有机流体实现选择性过滤<sup>[120]</sup>,在离子流体的辅助下,氧化石墨烯膜可以对二氧化碳起到选择性过滤的效果<sup>[121]</sup>。通过外电场也可以实现选择性过滤,其中起过滤功能的是受限在氧化石墨烯纳米孔中的离子流体,在外电场作用下流体中的阴阳离子会重新分布降低吸附能<sup>[122-123]</sup>。在分子尺度的受限通道内脱水过程对离子输运有显著影响,甚至会排斥离子进入<sup>[124-125]</sup>,同时阴阳离子受到的摩擦力大

小明显不同,使得它们具有不同的输运行为<sup>[126]</sup>。与石墨烯结构类似的同素异形体石墨炔(graphyne)具有天然的尺寸可调孔洞,也可以用于过滤水和气体<sup>[127]</sup>。中国科学院力学研究所研究人员对固液界面的演化行为和溶质输运模式进行了系统研究<sup>[128-129]</sup>,提出一个新方法来分析固液界面的演化以及溶质在界面的输运过程,揭示了溶质输运的两种新模式<sup>[130]</sup>。

## 4 生物和软物质力学性能

清华大学研究组在《Cell》发表论文,揭示热应力对人体癌细胞的影响,该工作通过长时间观测在热应力作用下细胞的演化过程,发现热应力会加速MGC-803和MCF-7细胞的多极分裂<sup>[131]</sup>。温度对脂质纳米泡在水凝胶中的输运过程也有很大的影响<sup>[132]</sup>,Ding等揭示了表面应力对软生物组织力学性能的影响<sup>[133]</sup>。

在2019年,国内外学者提出多种理论方案来研究软物质的各种力学性能以及应用。在理论方面,从微观物理机制出发,可以建构软材料的粘弹性基本模型,其中弹性基底提供了超弹性功能而自由链起到黏滞效果<sup>[134]</sup>,该方法也可以分析软物质的损伤现象<sup>[135]</sup>。此外基于能量分析的强度理论可以很好地描述软弹性薄膜在外载荷下的失效过程<sup>[136]</sup>,而通过非线性运动模型能够对介电弹性体驱动器进行有效的描述<sup>[137]</sup>。

在力学现象方面,软物质在高速加载下会发生空化现象,影响组织的结构和功能,软物质内微小气泡缺陷的尺寸对空化现象具有很强的影响<sup>[138]</sup>。Yin等<sup>[139]</sup>对介电弹性薄膜中圆形孔洞在外加机械或者电场载荷下的变形和破坏过程进行了实验和理论研究。研究表明低温下水凝胶具有冰的许多性质,同时又兼有很好的可延展性,可以承受较大的弯曲、扭曲等变形<sup>[140]</sup>。

在软物质的应用研究方面,利用3D打印技术可以制造介电弹性体驱动器<sup>[141]</sup>,介电弹性体材料能制造双稳态转动驱动器,实现比较大的驱动转动角

度,并且运动模式可以重复<sup>[142]</sup>;介电弹性体还可以进行重复的纯剪切变形<sup>[143]</sup>。关于软材料驱动器的最新进展可以参阅相关综述文章<sup>[144]</sup>。此外,水凝胶可以用作弹性消能器<sup>[145]</sup>,透明柔性复合材料可以用做高灵敏度的压阻传感器<sup>[146]</sup>。

## 5 软体机器人

极端环境下工作的机器人和多功能机器人一直得到很多的研究。软体机器人能够承受很大的变形,在极高压等环境有良好的应用前景。浙江大学研究团队设计出具有复合结构、通过化学反应驱动的软引擎,该器件通过化学反应直接将内能转换为机械能,实现大的驱动和快速反应<sup>[147]</sup>。通过仿生水母的游泳形态,研究人员设计出能够在深海中以3.2 mm/s速度前进的软体机器人<sup>[148]</sup>,使用介电弹性体可以制作行动灵活且自适应能力强的仿生软体机器人<sup>[149]</sup>。通过动力学建模可以分析蚯蚓类型的爬行机器人在平面内的运动过程<sup>[150]</sup>。

## 6 机器学习

最近几年,上海大学张统一在国内大力倡导力学信息学,也促进了机器学习方法在纳米力学中的应用,提高了材料搜索与结构设计的效率。例如,支持向量机模型可以比较高效地搜索出体心立方和面心立方的高熵合金<sup>[151]</sup>;高通量计算帮助研究人员搜索到了一百多种稳定的二维纳米材料,这些金属氢化物没有相对应的三维结构,并且包含了金属性和半导体性等各种独特性能<sup>[152]</sup>;深度神经网络方法能够帮助确立宏观力学性能与介观结构之间的联系,从而高效地预测多组分构成的复合材料的力学性能<sup>[153]</sup>。利用卷积神经网络方法能设计出具有最低热导率的多孔石墨烯结构<sup>[154]</sup>;深度学习算法还可以建立人造声子晶体的拓扑性质与声波传播特性之间的映射关系,从而可以反向设计出满足特殊隔声条件的结构<sup>[155]</sup>。

## 7 结论

梳理了微纳米力学研究领域2019年的主要研究进展,特别分析了中国研究人员在该领域取得的学术成果。当前微纳米力学研究大部分与界面直接或者间接相关,主要体现在3个方面的研究:(1)固固界面的黏结强度、摩擦和超润滑,以及固液界面;(2)水的输运和净化,包括水伏发电和离子选择性过滤等效应,这类现象通常与固液界面的力学性能紧密联系;(3)二维纳米材料屈曲相关的机理分析、以及屈曲失稳在柔性电子器件方面的应用,由于二维纳米材料的屈曲经常与衬底相关,所以这类研究通常与固固界面紧密相联。目前的研究主要是对这些与界面相关的力学过程进行深入的机理分析,揭示一些有趣的纳米力学现象,并且发掘其中的微观机制。通过分析2019年微纳米力学相关研究进展,可以看到目前国内的微纳米力学领域涌现出了大量原创性工作,少数已经在应用方面取得了重要突破,特别如水伏效应、纳米摩擦、柔性电子器件等都在国际上产生了重大影响。但是我们也要看到一些不足之处,如计算方面重模拟轻算法、理论方面重个例轻体系、实验方面重结果轻技术(包括测试技术和设备开发技术)等。

### 参考文献(References)

- [1] Kroto H W, Heath J R, O'Brien S C, et al. C60: Buckminsterfullerene[J]. *Nature*, 1985, 318: 162.
- [2] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. *Nature*, 1991, 354: 56-58.
- [3] Geim A K. Graphene: Status and prospects[J]. *Science*, 2009, 324: 1530-1534.
- [4] Novoselov K S, Jiang D, Schedin F, et al. Two-dimensional atomic crystals[J]. *PNAS*, 2005, 102: 10451-10453.
- [5] Geim A K, Grigorieva I V. Van der Waals heterostructures [J]. *Nature*, 2013, 499: 419-425.
- [6] Xu Z P, Zheng Q S. Micro- and nano-mechanics in China: A brief review of recent progress and perspectives[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018, 61: 074601.
- [7] Yang W, Wang H T, Li T F, et al. X-Mechanics—An endless frontier[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62: 14601.
- [8] Banerjee A, Bernoulli D, Zhang H T, et al. Ultralarge elastic deformation of nanoscale diamond[J]. *Science*, 2018, 360: 6386.
- [9] Zhang H T, Fung K Y, Zhuang Y, et al. Fracture of a silicon nanowire at ultra-large elastic strain[J]. *Acta Mechanica*, 2019, 230: 1441-1449.
- [10] Sun H L, Chen L Y, Sun S, et al. Size- and temperature-dependent Young's modulus and size-dependent thermal expansion coefficient of nanowires[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 61: 687-698.
- [11] Liu W B, Chen L R, Cheng Y Y, et al. Model of nanoindentation size effect incorporating the role of elastic deformation[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 126: 245-255.
- [12] Ren Y P, Cao G X. Adhesive boundary effect on free-standing indentation characterization of chemical vapor deposition graphene[J]. *Carbon*, 2019, 153: 438-446.
- [13] Ji J C, Zhao J H, Guo W L. Novel nonlinear coarse-grained potentials of carbon nanotubes[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 128: 79-104.
- [14] Wen X, Li D F, Tan K, et al. Flexoelectret: An electret with a tunable flexoelectriclike response[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 148001.
- [15] Shi W H, Guo Y F, Zhang Z H, et al. Strain gradient mediated magnetism and polarization in monolayer VSe2 [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123: 24988-24993.
- [16] Cai H F, Guo Y F, Gao H J, et al. Tribo-piezoelectricity in Janus transition metal dichalcogenide bilayers: A first-principles study[J]. *Nano Energy*, 2019, 56: 33-39.
- [17] Hu Z L, Zhang Z H, Liu L R, et al. Extreme pseudomagnetic fields in carbon nanocones by simple loads[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 124: 1-9.
- [18] Liu X F, Guo W L. Shear strain tunable exciton dynamics in two-dimensional semiconductors[J]. *Physical Review B*, 2019, 99: 035401.
- [19] Zeng X G, Wei Y J. The effective fracture strength and fracture toughness of solids with energy dissipation confined to localized strips[J]. *International Journal of Plasticity*, 2019, 120: 47-63.
- [20] Sha Z D, Teng Y, Poh L H, et al. Notch strengthening in nanoscale metallic glasses[J]. *Acta Materialia*, 2019,

- 169: 147–154.
- [21] Dong S H, Xia Y X, Huang R Y, et al. Modulating mechanical anisotropy of two-dimensional materials by controlling their defects[J]. *Carbon*, 2020, 158: 77–88.
- [22] Wang P, Xiang Y H, Wang X G, et al. New insight for mechanical properties of metals processed by severe plastic deformation[J]. *International Journal of Plasticity*, 2019, 123: 22–37.
- [23] Chen L R, Liu W B, Yu L, et al. Probabilistic and constitutive models for ductile-to-brittle transition in steels: A competition between cleavage and ductile fracture[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 135: 103809.
- [24] Peng S Y, Wei Y J, Jin Z H, et al. Supersonic screw dislocations gliding at the shear wave speed[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 045501.
- [25] Wang Y, Yuan L C, Zhang S J, et al. The influence of combined gradient structure with residual stress on crack-growth behavior in medium carbon steel[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 209: 369–381.
- [26] Cheng Y Y, Yu L, Chen L R, et al. Failure of fracture toughness criterion at small scales[J]. *Physical Review Materials*, 2019, 3: 113602.
- [27] Dai Z H, Wang G R, Zheng Z Y, et al. Mechanical responses of boron-doped monolayer graphene[J]. *Carbon*, 2019, 147: 594–601.
- [28] Ren X B, Dong J C, Yang P, et al. Grain boundaries in chemical-vapor-deposited atomically thin hexagonal boron nitride[J]. *Physical Review Materials*, 2019, 3: 014004.
- [29] Zhao Z Q, Hang Y, Zhang Z H, et al. Topological hybrid nodal-loop semimetal in a carbon allotrope constructed by interconnected Riemann surfaces[J]. *Physical Review B*, 2019, 100: 115420.
- [30] Zhao Z Q, Zhang Z H, Guo W L. A family of all sp<sup>2</sup>-bonded carbon allotropes of topological semimetals with strain-robust nodal-lines[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, doi: 10.1039/C9TC05470G.
- [31] Bu Y Q, Li Z M, Liu J B, et al. Nonbasal slip systems enable a strong and ductile hexagonal-close-packed high-entropy phase[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 075502.
- [32] Yuan Y S, Li X Y, Yang W. Low-angle grain boundary structures and size effects of nickel nanolaminated structures[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 130: 280–296.
- [33] Zhang X, Zhong L, Mateos A, et al. Theoretical strength and rubber-like behaviour in micro-sized pyrolytic carbon[J]. *Nature nanotechnology*, 2019, 14: 762–769.
- [34] Yu Z L, Qin B, Ma Z Y, et al. Superelastic hard carbon nanofiber aerogels[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1900651.
- [35] Zhang X, Vyatskikh A, Gao H, et al. Lightweight, flaw-tolerant, and ultrastrong nanoarchitected carbon[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116: 6665–6672.
- [36] Zhang X, Wang Y J, Ding B, et al. Design, fabrication, and mechanics of 3D micro-/nanolattices[J]. *Small*, 2019, doi: 10.1002/sml.201902842.
- [37] Liang Y J, Wang L J, Wen Y R, et al. High-content ductile coherent nanoprecipitates achieve ultrastrong high-entropy alloys[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4063.
- [38] Xie F, Xu Z, Jensen A C S, et al. Hard-soft carbon composite anodes with synergistic sodium storage performance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29: 1901072.
- [39] Dong X Z, Xu H Y, Chen H, et al. Commercial expanded graphite as high-performance cathode for low-cost aluminum-ion battery[J]. *Carbon*, 2019, 148: 134–140.
- [40] Liu Y J, Li P, Wang F, et al. Rapid roll-to-roll production of graphene film using intensive Joule heating[J]. *Carbon*, 2019, 155: 462–468.
- [41] Liu Y J, Yang M C, Pang K, et al. Environmentally stable macroscopic graphene film with specific electrical conductivity exceeding metals[J]. *Carbon*, 2020, 156: 205–211.
- [42] Pan F, Li Y L, Li Z Y, et al. 3D pixel mechanical metamaterials[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1900548.
- [43] Wang J, Huang Y, Chen W Q. Tailoring edge and interface states in topological metastructures exhibiting the acoustic valley Hall effect[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 63: 224611.
- [44] Li G Y, Zhu M Y, Gong W B, et al. Boron nitride aerogels with super-flexibility ranging from liquid nitrogen temperature to 1000°C[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29: 1900188.
- [45] Gao E L. Measuring the radial elasticity of carbon nanotube yarns[J]. *Carbon*, 2020, 157: 402–407.
- [46] Chen Z, Wu T H, Nian G D, et al. Ron Resch origami pattern inspired energy absorption structures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2019, 86: 011005.

- [47] Wen Y Y, Gao E L, Hu Z X, et al. Chemically modified graphene films with tunable negative Poisson's ratios[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2446.
- [48] Xu G, Liu Y Y, Hong J W, et al. Lithium intercalation drives mechanical properties deterioration in bulk and single-layered black phosphorus: A first-principles study[J]. *2D Materials*, 2020, doi: 10.1088/2053-1583/ab6705.
- [49] Wang H P, Xue X D, Jiang Q Q, et al. Primary nucleation-dominated chemical vapor deposition growth for uniform graphene monolayers on dielectric substrate[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141: 11004-11008.
- [50] Wu R Z, Ding Y, Yu K M, et al. Edge-epitaxial growth of graphene on Cu with a hydrogen-free approach[J]. *Chemistry of Materials*, 2019, 31: 2555-2562.
- [51] He W Z, Geng D C, Xu Z P. Pattern evolution characterizes the mechanism and efficiency of CVD graphene growth[J]. *Carbon*, 2019, 141: 316-322.
- [52] Li J D, Hu Z L, Yi Y F, et al. Hexagonal boron nitride growth on Cu-Si Alloy: Morphologies and large domains [J]. *Small*, 2019, 15: 1805188.
- [53] Liu Z. Investigation of temperature and feature size effects on deformation of metals by superplastic nanomolding[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 016101.
- [54] Liu Z, Han G X, Sohn S, et al. Nanomolding of crystalline metals: The smaller the easier[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 036101.
- [55] Ren H T, Xiong Z X, Wang E Z, et al. Watching dynamic self-assembly of web buckles in strained MoS<sub>2</sub> thin films[J]. *ACS Nano*, 2019, 13: 3106-3116.
- [56] Shui L Q, Liu Y L, Li B, et al. Mechanisms of electromechanical wrinkling for highly stretched substrate-free dielectric elastic membrane[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 122: 520-537.
- [57] Yin S F, Li B, Cao Y P, et al. Surface wrinkling of anisotropic films bonded on a compliant substrate[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 141: 219-231.
- [58] Liu J P, Zhong X Y, Cheng Z B, et al. Post-buckling analysis of a rod confined in a cylindrical tube[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2018, 85: 071001.
- [59] Liu J P, Zhong X Y, Cheng Z B, et al. Buckling of a slender rod confined in a circular tube: Theory, simulation, and experiment[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 140: 288-305.
- [60] Li B, Zeng C Q, Yin S F, et al. Regulating wrinkling patterns by periodic surface stiffness in film-substrate structures[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62: 747-754.
- [61] Yu S J, Ma L, Zhang J W, et al. Localization of wrinkle patterns by crack-tip induced plasticity: Experiments and simulations[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 178-179: 108-119.
- [62] Yu S J, Sun Y D, Zhang X F, et al. Hierarchical wrinkles and oscillatory cracks in metal films deposited on liquid stripes[J]. *Physical Review E*, 2019, 99: 062802.
- [63] Yu S J, Ma L, Sun Y D, et al. Controlled wrinkling patterns in periodic thickness-gradient films on polydimethylsiloxane substrates[J]. *Langmuir*, 2019, 35: 7146-7154.
- [64] Sui J, Chen J, Zhang X, et al. Symplectic analysis of wrinkles in elastic layers with graded stiffnesses[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 86: 011008.
- [65] Pang Z Q, Deng B, Liu Z F, et al. Defects guided wrinkling in graphene on copper substrate[J]. *Carbon*, 2019, 143: 736-742.
- [66] Wang T, Yang Y F, Fu C B, et al. Wrinkling and smoothing of a soft shell[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 134: 103738.
- [67] Liu F, Xu F, Fu C B. Orientable wrinkles in stretched orthotropic films[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2019, 33: 100579.
- [68] Pan F, Wang G R, Liu L Q, et al. Bending induced interlayer shearing, rippling and kink buckling of multilayered graphene sheets[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 122: 340-363.
- [69] Wang G R, Dai Z H, Xiao J K, et al. Bending of multilayer van der Waals materials[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123: 116101.
- [70] Cui X P, Kong Z Z, Gao E L, et al. Rolling up transition metal dichalcogenide nanoscrolls via one drop of ethanol [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1301.
- [71] Pang W B, Cheng X, Zhao H J, et al. Electro-mechanically controlled assembly of reconfigurable 3D mesostructures and electronic devices based on dielectric elastomer platforms[J]. *National Science Review*, 2020, doi: 10.1093/nsr/nwz164.
- [72] Zheng M J, Chen Y Q, Liu Z, et al. Kirigami-inspired multiscale patterning of metallic structures via pre-defined nanotrench templates[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2019, 5: 1-11.
- [73] Park J K, Nan K, Luan H W, et al. Remotely triggered

- assembly of 3D mesostructures through shape-memory effects[J]. *Advanced Materials*, 2019, doi: 10.1002/adma.201905715.
- [74] Liu Y, Wang X J, Xu Y M, et al. Harnessing the interface mechanics of hard films and soft substrates for 3D assembly by controlled buckling[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116: 15368–15377.
- [75] Xue Z G, Song H L, Rogers J A, et al. Mechanically-guided structural designs in stretchable inorganic electronics[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1902254.
- [76] Zhao H B, Li K, Han M D, et al. Buckling and twisting of advanced materials into morphable 3D mesostructures [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116: 13239–13248.
- [77] Xu Z, Fan Z C, Fu H R, et al. Optimization-based approach for the inverse design of ribbon-shaped three-dimensional structures assembled through compressive buckling[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11: 054053.
- [78] Xu Z, Fan Z C, Zi Y Y, et al. An inverse design method of buckling-guided assembly for ribbon-type 3D structures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2020, 87: 031004 .
- [79] Lan L Y, Yin T H, Jiang C M, et al. Highly conductive 1D–2D composite film for skin-mountable strain sensor and stretchable triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2019, 62: 319–328.
- [80] Li B W, Yin J, Liu X F, et al. Probing van der Waals interactions at two-dimensional heterointerfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14: 567–572.
- [81] Zhao S J, Zhang Z H, Wu Z H, et al. The impacts of adhesion on the wear property of graphene[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6: 1900721.
- [82] Gao E L, Lin S Z, Qin Z, et al. Mechanical exfoliation of two-dimensional materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 115: 248–262.
- [83] Li S, Yao Q Z, Li Q Y, et al. Contact stiffness of regularly patterned multi-asperity interfaces[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 111: 277–289.
- [84] He Z Z, Zhu Y B, Xia J, et al. Optimization design on simultaneously strengthening and toughening graphene-based nacre-like materials through noncovalent interaction[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 133: 103706.
- [85] Xia J, Zhu Y B, He Z Z, et al. Superstrong noncovalent interface between melamine and graphene oxide[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11: 17068–17078.
- [86] Chang Z H, Yang R G, Wei Y J. The linear-dependence of adhesion strength and adhesion range on temperature in soft membranes[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 132: 103697.
- [87] Chen P J, Chen S H, Peng J, et al. The interface behavior of a thin film bonded imperfectly to a finite thickness gradient substrate[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 217: 106529.
- [88] Li X J, Peng Z L, Yang Y Z, et al. Tunable adhesion of a bio-inspired micropillar arrayed surface actuated by a magnetic field[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2019, 86: 011007.
- [89] Zhu F Y, Guo Z R, Chang T C. Nanoscale continuous cyclic motion driven by a stable thermal field[J]. *Applied Materials Today*, 2019, 18: 100520.
- [90] Song A S, Shi R Y, Lu H L, et al. Modelling atomic-scale electrical contact quality across two-dimensional interfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19: 3654–3662.
- [91] Zhang H, Xiong J H, Ye M, et al. Interfacial properties of monolayer antimonene devices[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11: 064001.
- [92] Xue Y X, Chen Y, Cai K, et al. Local strain field engineering on interfacial thermal resistance of graphene nanoribbon[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112: 021604.
- [93] Song Y M, Mandelli D, Hod O, et al. Robust microscale superlubricity in graphite/hexagonal boron nitride layered heterojunctions[J]. *Nature Materials*, 2018, 17: 894.
- [94] Wang J, Cao W, Song Y M, et al. Generalized scaling law of structural superlubricity[J]. *Nano Letters*, 2019, doi: 10.1021/acs.nanolett.9b02656.
- [95] Qu C Y, Shi S L, Ma M, et al. Rotational instability in superlubric joints[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 246101.
- [96] Qu C Y, Cao W, Liu B T, et al. Direct measurement of adhesions of liquids on graphite[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, doi: 10.1021/acs.jpcc.9b00900.
- [97] Huang X Y, Lin L, Zheng Q S. Superlubric nanogenerators with superb performances[J]. arXiv: 1911.04764, 2019.
- [98] Hod O, Meyer E, Zheng Q S, et al. Structural superlubricity and ultralow friction across the length scales[J]. *Nature*, 2018, 563: 485–492.
- [99] Song Y M, Qu C Y, Ma M, et al. Structural superlubricity based on crystalline materials[J]. *Small*, 2019, doi: 10.1002/sml.201903018.

- [100] Zhang S, Ma T B, Erdemir A, et al. Tribology of two-dimensional materials: From mechanisms to modulating strategies[J]. *Materials Today*, 2019, 26: 67–86.
- [101] Lin X, Zhang H W, Guo Z R, et al. Strain engineering of friction between graphene layers[J]. *Tribology International*, 2019, 131: 686–693.
- [102] Wang K Q, Ouyang W G, Cao W, et al. Robust superlubricity by strain engineering[J]. *Nanoscale*, 2019, 11: 2186–2193.
- [103] Wang K, Qu C, Wang J, et al. Strain engineering modulates graphene interlayer friction by moiré pattern evolution[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11: 36169–36176.
- [104] Zhang S, Hou Y, Li S Z, et al. Tuning friction to a superlubric state via in-plane straining[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116: 24452–24456.
- [105] Gongyang Y J, Qu C Y, Zhang S M, et al. Eliminating delamination of graphite sliding on diamond-like carbon[J]. *Carbon*, 2018, 132: 444–450.
- [106] Gongyang Y J, Ouyang W G, Qu C Y, et al. Temperature and velocity dependent friction of a microscale graphite–DLC heterostructure[J]. *Friction*, 2019, doi: 10.1007/s40544-019-0288-0.
- [107] Deng H, Ma M, Song Y M, et al. Structural superlubricity in graphite flakes assembled under ambient conditions[J]. *Nanoscale*, 2018, 10: 14314–14320.
- [108] Qi Y Z, Liu J, Dong Y L, et al. Impacts of environments on nanoscale wear behavior of graphene: Edge passivation vs. substrate pinning[J]. *Carbon*, 2018, 139: 59–66.
- [109] Liu J, Qi Y Z, Li Q Y, et al. Vacancy-controlled friction on 2D materials: Roughness, flexibility, and chemical reaction[J]. *Carbon*, 2019, 142: 363–372.
- [110] Liu X F, Li Y, Guo W L. Friction modulation via photoexcitation in two-dimensional material[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, doi: 10.1021/acsaami.9b20285.
- [111] Li Q Y, Nian G D, Tao W M, et al. Temperature-dependent interfacial debonding and frictional behavior of fiber-reinforced polymer composites[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2019, 86: 091010.
- [112] Fei W W, Shen C, Zhang S Y, et al. Waving potential at volt level by a pair of graphene sheets[J]. *Nano Energy*, 2019, 60: 656–660.
- [113] Feng S Z, Xu Z P. Edge facilitates water evaporation through nanoporous graphene[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30: 165401.
- [114] Shen C, Guo W L. Manipulation of long-range water ordering in less confined nanotubes[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123: 10101–10106.
- [115] Shen C, Qiu H, Guo W L. Soliton-like propagation of dipole reorientation in confined single-file water chains [J]. *Nanoscale*, 2019, doi: 10.1039/C9NR03631H.
- [116] Geng H Y, Zhou K, Zhou J J, et al. Sunlight-driven water transport via a reconfigurable pump[J]. *Angewandte Chemie*, 2018, 130: 15661–15666.
- [117] Qiu H, Guo W L. Phase diagram of nanoscale water on solid surfaces with various wettabilities[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10: 6316–6323.
- [118] Xue M M, Guo W L. Water models for interfacial water simulations[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62: 729–735.
- [119] Qiao S S, Li Q Y, Feng X Q. Sliding friction and contact angle hysteresis of droplets on microhole-structured surfaces[J]. *The European Physical Journal E*, 2018, 41: 25.
- [120] Jiao S P, Zhou K, Wu M M, et al. Confined structures and selective mass transport of organic liquids in graphene nanochannels[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10: 37014–37022.
- [121] Ying W, Cai J, Zhou K, et al. Ionic liquid selectively facilitates CO<sub>2</sub> transport through graphene oxide membrane[J]. *ACS Nano*, 2018, 12: 5385–5393.
- [122] Fei W W, Xue M M, Qiu H, et al. Heterogeneous graphene oxide membrane for rectified ion transport[J]. *Nanoscale*, 2019, 11: 1313–1318.
- [123] Ying W, Zhou K, Hou Q G, et al. Selectively Tune gas transport through ionic liquid filled graphene oxide nanoslits by electric field[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7: 15062–15067.
- [124] Gopinadhan K, Hu S, Esfandiar A, et al. Complete steric exclusion of ions and proton transport through confined monolayer water[J]. *Science*, 2019, 363(6423): 145–148.
- [125] Yu Y Z, Fan J C, Xia J, et al. Dehydration impeding ionic conductance through two-dimensional angstrom-scale slits[J]. *Nanoscale*, 2019, 11: 8449–8457.
- [126] Yu Y Z, Fan J C, Esfandiar A, et al. Charge asymmetry effect in ion transport through angstrom-scale channels[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123: 1462–1469.

- [127] Qiu H, Xue M M, Shen C, et al. Graphynes for water desalination and gas separation[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1803772.
- [128] Yang J H, Yuan Q Z, Zhao Y P. Evolution of the interfacial shape in dissolutive wetting: coupling of wetting and dissolution[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 201–207.
- [129] Miao Q, Yuan Q Z, Zhao Y P. Dissolutive flow in nanochannels: Transition between plug-like and Poiseuille-like[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2018, 22: 141.
- [130] Yang J H, Yuan Q Z, Zhao Y P. Solute transport and interface evolution in dissolutive wetting[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62: 124611.
- [131] Chen S Y, Liu M Y, Huang H M, et al. Heat stress-induced multiple multipolar divisions of human cancer cells[J]. *Cell*, 2019, 8: 888.
- [132] Yu M R, Song W Y, Tian F L, et al. Temperature-and rigidity-mediated rapid transport of lipid nanovesicles in hydrogels[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116: 5362–5369.
- [133] Ding Y, Wang G F, Feng X Q, et al. Micropipette aspiration method for characterizing biological materials with surface energy[J]. *Journal of Biomechanics*, 2018, 80: 32–36.
- [134] Xiang Y H, Zhong D M, Wang P, et al. A physically based visco-hyperelastic constitutive model for soft materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 128: 208–218.
- [135] Zhong D M, Xiang Y H, Yin T H, et al. A physically-based damage model for soft elastomeric materials with anisotropic Mullins effect[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 176–177: 121–134.
- [136] Pourmodheji R, Qu S X, Yu H H. Energy-based strength theory for soft elastic membranes[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2019, 86: 071008.
- [137] Zhang M Q, Cao X N, Chen X P, et al. Model-based nonlinear control of the dielectric elastomer actuator with high robustness and precision[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2019, 86: 121004.
- [138] Fu Y M, Lu H T, Nian G D, et al. Size-dependent inertial cavitation of soft materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 137: 103859.
- [139] Yin T H, Wang P, Yu H H, et al. Failure of soft dielectric membrane with a hole subjected to mechanical and electric loads[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2019, 117: 103243.
- [140] Rao P, Li T F, Wu Z L, et al. Ductile “Ice”: Frozen hydrogels with high ductility and compressive yielding strength[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2019, 28: 43–49.
- [141] Zhou F H, Zhang M Q, Cao X N, et al. Fabrication and modeling of dielectric elastomer soft actuator with 3D printed thermoplastic frame[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 292: 112–120.
- [142] Liu Y D, Liu B H, Yin T H, et al. Bistable rotating mechanism based on dielectric elastomer actuator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 29: 015008.
- [143] Chen Y F, Kang G Z, Yuan J H, et al. Experimental study on pure-shear-like cyclic deformation of VHB 4910 dielectric elastomer[J]. *Journal of Polymer Research*, 2019, 26: 186.
- [144] Cao X N, Zhang M Q, Zhang Z, et al. Review of soft linear actuator and the design of a dielectric elastomer linear actuator[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2019, 32: 566–579.
- [145] Liu J J, Yang C H, Yin T H, et al. Polyacrylamide hydrogels. II. Elastic dissipater[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 133: 103737.
- [146] Wang S, Chen G R, Niu S Y, et al. Magnetic assisted, transparent and flexible percolative composite for highly sensitive piezoresistive sensor via hot embossing technology[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11: 48331–48340.
- [147] Chen L Y, Chen W J, Xue Y T, et al. An untethered soft chemo-mechanical robot with composite structure and optimized control[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2019, 27: 27–33.
- [148] Christianson C, Bayag C, Li G R, et al. Jellyfish-inspired soft robot driven by fluid electrode dielectric organic robotic actuators[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2019, doi: 10.3389/frobt.2019.00126.
- [149] Li T F, Zou Z N, Mao G Y, et al. Agile and resilient insect-scale robot[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6: 133–141.
- [150] Zhan X, Fang H B, Xu J, et al. Planar locomotion of earthworm-like metameric robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2019, 38: 1751–1774.
- [151] Li Y, Guo W L. Machine-learning model for predicting phase formations of high-entropy alloys[J]. *Physical Review Materials*, 2019, 3: 095005.
- [152] Zhou X C, Hang Y, Liu L R, et al. A large family of synthetic two-dimensional metal hydrides[J]. *Journal*

- of the American Chemical Society, 2019, 141: 7899–7905.
- [153] Li X, Liu Z, Cui S, et al. Predicting the effective mechanical property of heterogeneous materials by image based modeling and deep learning[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 347: 735–753.
- [154] Wan J, Jiang J W, Park H S. Machine learning-based design of porous graphene with low thermal conductivity[J]. Carbon, 2020, 157: 262–269.
- [155] Li X, Ning S, Liu Z, et al. Designing phononic crystal with anticipated band gap through a deep learning based data-driven method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, doi: 10.1016/j.cma.2019.112737.

## Recent progress in micro and nanomechanics: A concise review

JIANG Jin-Wu, CHANG Tienchong

Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics; School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** Mechanical properties for nanomaterial are sensitive to the dimension, surface, and other physical properties of the nanomaterial, so they can be effectively tuned in varying degrees. As a result, nanomaterials have plenty of novel properties like super-hardness, ultra-light, extreme fracture strength, etc. These fantastic nanomechanics phenomena have attracted a worldwide research interest in the past few decades. The article concisely reviews some key progresses in the nanomechanics field in 2019.

**Keywords** nano materials; size effect; multifield coupling; defect; buckling; interface; soft mater; soft robotics; deep learning ●



(责任编辑 刘志远)