

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.230213

## 软体机器人离子/电响应驱动材料与结构进展

吴佳祥, 邱林涛, 王吕婷, 赵雨开, 张凯航, 石 焯, 杨栩旭, 李铁风

(浙江大学, 浙江 杭州 310013)

**摘要:** 介电弹性体和水凝胶这些软材料具有特殊的物理和化学特性, 能够对外界刺激做出良好响应, 使其成为新型软驱动器、可穿戴设备、医疗保健设备和人机交互机器人的重要组成部分。本文首先探讨了电子型电活性聚合物(介电弹性体材料)的应用前景和改良路径。讨论了硅橡胶类、聚氨酯类和丙烯酸酯类介电弹性体的性能和优缺点, 阐述了该类材料在人工肌肉中的应用前景及局限性。进而提出了利用瓶刷式介电弹性体(BBE)以及互穿型网络结构(IPN)改良材料性能等解决方案。其次, 介绍了电磁响应型、渗透压响应型以及光响应型水凝胶驱动器, 并对其各自的工作原理和应用进行了全面的阐述。最后, 总结了介电弹性体和水凝胶两类驱动材料与结构对软体机器人性能的影响, 展示了这两大类驱动器在软体机器人、人工肌肉和智能传感器等领域的应用可能性, 并提出了未来的一些研究方向。

**关键词:** 介电弹性体; 多功能材料; 水凝胶驱动器; 软体机器人

### Advancements in Ionic/Electroactive Materials and Structures for Soft Robotics

WU Jiexiang, QIU Lintao, WANG Lüting, ZHAO Yukai, ZHANG Kaihang, SHI Ye,  
YANG Xuxu, LI Tiefeng

(Zhejiang University, Hangzhou 310013, China)

**Abstract:** Dielectric elastomers and hydrogels possess some special physical and chemical properties, and respond well to external stimuli, which make them important components of new soft actuators, wearable devices, medical healthcare equipment, and human-machine interactive robots. This article firstly explores the application prospects and improvement paths of electronic-type electroactive polymers, i.e. dielectric elastomer materials. By discussing the performance, advantages, and disadvantages of silicon rubber, polyurethane, and acrylic ester-based dielectric elastomers, the current application potential and limitations of these materials in artificial muscles are elucidated. Subsequently, some solutions are proposed, including the use of brush-like dielectric elastomers (BBE) and interpenetrating network structures (IPN) to enhance material performance. Secondly, electromagnetic-responsive, osmotic-pressure-responsive, and photo-responsive hydrogel actuators are introduced, providing comprehensive explanations of their respective working principles and applications. Finally, the impacts of both dielectric elastomers and hydrogels as two types of driving materials and structures on soft robotics performance are summarized, and the broad application potentials of these two types of actuators are showed in areas such as soft robotics, artificial muscles, and intelligent sensors, and some future research directions are suggested.

**Keywords:** dielectric elastomer; multifunctional material; hydrogel actuator; soft robot

近年来, 新材料与技术的发展带来了一系列具有各种形式、功能和外观的新型软体机器人。相比于硬质材料构成的传统机器人依靠电机驱动, 并通过轴承连杆完成一些动作, 类生物的软体机器人可在外界刺激下在特定方向上实现不同形变, 且在复杂的自然环境中有良好的适应性, 更符合“仿生机器人”这一概念。其独有的“柔性”为机器人技术开辟了新的应用领域, 并由此孕育了制造技术和理论新的研究方向<sup>[1]</sup>。

不同于传统软体机器人采用气动或线驱动方式, 其材料本身没有响应性, 有些驱动材料也非软体, 介电弹性体和水凝胶都是本体模量低、拉伸率高的软材料, 并且能够在外界刺激下发生响应性变形。这两类软材料在外部电场或光热等刺激下, 材料内部带电粒子的迁移会导致材料整体发生复杂的变形。介电弹性体和水凝胶是其中两种典型的软驱动材料, 能够在电子迁移或离子迁移作用下, 形成非均匀场效应而产生驱动。其中介电弹性体能够在

外部电场下由于电荷的聚集而发生快速响应变形, 而水凝胶材料能因离子迁移而发生局部的体积变化。这两类材料具有截然不同的驱动形式, 却都能够被用于软体机器人中, 通过结构设计实现机器人驱动。其应用领域包括水下探测<sup>[2-5]</sup>、康复辅助机器人<sup>[6-8]</sup>和柔性机械臂<sup>[9-12]</sup>等。目前软体机器人的设计很大程度上依赖于人类的直觉和经验。尽管在建模和软材料的控制方面已经取得了重大进展, 但这个领域仍然有待探索<sup>[13-14]</sup>。目前, 软体机器人已经具备高速、低噪声、高环境适应性等性能, 能够高效地完成传统刚性机器人难以完成的任务, 但建立一个完备的软体机器人设计方案的基础体系仍然是一个挑战。

## 1 介电弹性体驱动的软体机器人 (Dielectric elastomer actuated soft robot)

电活性聚合物 (EAP) 是一种能将电能转换为机械能的智能聚合物材料, 具有与生物肌肉相似的一些特性, 例如密度小、弹性好、应变大和响应快速等, 因而又被称为“电驱动型人工肌肉”<sup>[15-17]</sup>, 近年来吸引了国内外学者们浓厚的研究兴趣。根据驱动机制, 可以将 EAP 分为两大类, 第一类是离子型电活性聚合物 (ionic EAP), 包括离子凝胶、导电聚合物和离子聚合物-金属复合材料 (IPMC), 该类材料发生形变的原理是聚合物内部的离子在电场驱动下发生迁移, 但它们主要以弯曲方式驱动, 能量密度低且驱动速度慢, 还需要在电解质环境中工作, 因此极大限制了它们在人工肌肉中的应用。第二类是电子型电活性聚合物 (electronic EAP), 包括铁电材料、液晶弹性体和介电弹性体。虽然相较于离子型 EAP, 电子型 EAP 需要较高电压驱动, 但其在外加电场作用下响应速度快, 并且形变持续时间长。

### 1.1 介电弹性体材料基础

介电弹性体 (DE) 是一种典型的电子型电活性聚合物材料。在外界电场作用下, 介电弹性体可快速响应, 产生较大的变形。因其具有能量密度高、弹性模量低、质量轻和造价低等优点<sup>[18-19]</sup>, 现已成为最具发展潜力的软体机器人材料之一。本节从介绍介电弹性体的工作原理出发, 综述具有代表性的介电弹性体材料。

介电弹性体本身并不导电, 是一种绝缘橡胶体。将电极材料涂覆在介电弹性体上下表面后, 组成介电弹性体驱动器 (DEA), 这种结构类似于“三明治”, 可视为一种柔性电容器。如图 1 所

示<sup>[20]</sup>, 在外部电场力作用下, 介电弹性体薄膜上下表面聚集的正负电荷相互吸引, 电极间产生麦克斯韦应力, 宏观表现为在  $z$  轴方向上介电弹性体薄膜压缩, 厚度减小, 在  $x$  和  $y$  轴方向即平面方向上薄膜面积扩张。所产生的麦克斯韦应力  $p$  可通过式 (1) 进行计算:

$$p = \epsilon_r \epsilon_0 E^2 \quad (1)$$

上式中,  $\epsilon_r$  为介电弹性体的相对介电常数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $E$  为外加电场的场强。假设介电弹性体是理想的, 则可用式 (2) 近似计算其厚度的变化:

$$S_z = -\frac{P}{Y} = -\frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{Y} \quad (2)$$

其中,  $Y$  代表介电弹性体材料的杨氏模量。在实际应用中, 研究者们最理想的情况是在低电压下使得介电弹性体材料获得大变形, 由式 (2) 可知, 为使介电弹性体获得更大的形变量, 最直接的方法是提高外电场场强, 但是材料本身的击穿场强是一定的, 这意味着外加电场的强度受材料本身的性质制约。除此之外, 还可以通过降低介电弹性体材料的杨氏模量 ( $Y$ )、提高介电弹性体材料的介电常数 ( $\epsilon_r$ ) 和降低介电弹性体膜厚的方式达到目的。

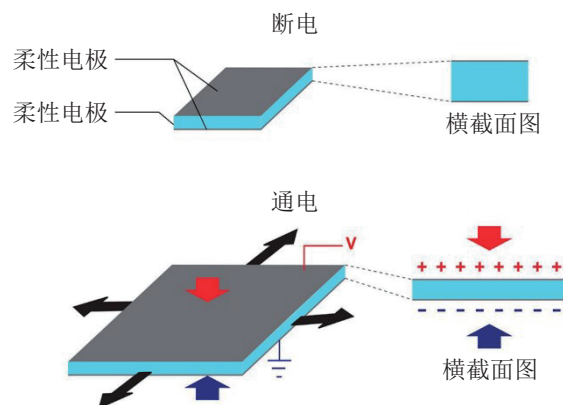


图 1 介电弹性体驱动器的工作原理

Fig.1 Working principle of the DEA

传统的介电弹性体材料主要有 3 大类, 分别为硅橡胶类、聚氨酯类和丙烯酸酯类, 它们也被视为最具应用潜力的 3 类介电弹性体材料。介电材料的特征及属性, 决定其用于软体机器人的驱动效能以及结构设计方法, 以下将从不同材料及其性能角度阐述各类材料介电弹性体的研究及应用。常见的硅橡胶类、聚氨酯类和丙烯酸酯类介电弹性体的基本介电和力学性能如表 1 所示。

表1 常见介电弹性体介电和力学性能参数

Tab.1 Dielectric and mechanical property parameters of common dielectric elastomers

介电弹性体材料	所属大类	杨氏模量 /MPa	介电常数	击穿场强 /(V/ $\mu\text{m}$ )	参考文献
LR3005/50	硅橡胶类	0.28	2.9	115	文 [26]
LR3043/50	硅橡胶类	0.53	2.8	144	文 [26]
LR3005/30	硅橡胶类	0.25	2.8	123	文 [26]
Si13481	硅橡胶类	0.61	3.64	50	文 [27]
MF620U	硅橡胶类	0.37	3.13	55.9	文 [28]
Bayfol	聚氨酯类	1.44	7.1	130	文 [29]
TPU-LPT4210	聚氨酯类	3.36	6	218	文 [29]
VHB	丙烯酸酯类	0.4~2.3	4.7	17~31	文 [29-30]

硅橡胶是以硅氧键重复单元作为主链，重复单元上有 2 个烃基作为侧基，最常见的烃基为甲基，聚合而成聚二甲基硅氧烷 (PDMS)。目前商用硅橡胶产品有很多，比如 Slygard 184、Slygard 186 和 Ecoflex 00-30 等，硅橡胶产品稳定性很好，对温度、湿度都不是很敏感，具有一定的驱动应变，且杨氏模量小，响应速度快，因此它们作为介电弹性体材料的应用十分广泛，在软体机器人领域更是备受青睐 [21-25]。

但硅橡胶介电弹性体作为一种非极性材料，介电常数比较低，约为 2.7，这就使得它们的能量密度较低，需要更高的驱动电压来产生一定的应变力，所以研究者们主要致力于提高该类弹性体的介电常数，以获得更理想的驱动应变。

丙烯酸酯类聚合物是最早用作介电弹性体材料的聚合物之一，3M 公司生产的商用丙烯酸酯双面胶 VHB4905 和 VHB4910 是非常经典的代表性材料，早在 2000 年，Pelrine 等 [31] 就通过施加预应变，使 VHB4910 材料的面积驱动应变达到 215%，该工作在《Science》上发表后，激起了丙烯酸酯弹性体的研究热潮。丙烯酸酯弹性体具有能量密度高和驱动应变大的优点，但是其黏弹性较高，导致其在电场中存在响应延迟的现象，应变产生后，整体性能也不够稳定。这类弹性体的介电常数约在 4.7 左右，但其优异的介电性能需要在施加预应变的条件下才能实现 [32-34]，即预拉伸弹性体薄膜后使用硬质框架固定，该种方式不仅工艺较复杂，引入刚性部件后会导致驱动应力松弛，而且柔性弹性体薄膜和硬质框架界面处还存在严重的应力限制。

聚氨酯类聚合物是一类极性聚合物，分子链上含有大量的极性基团，因此与硅胶类和丙烯酸酯类弹性体相比，聚氨酯类介电弹性体具有更高的介电常数，一般都大于 6。此外，聚氨酯类聚合物是多

段共聚物，分子链上有软链段和硬链段，在分子结构上具有可设计性。这些特点都决定了聚氨酯类介电弹性体在机械性能上有可观的调控范围 [35]。但是在这类弹性体内部交联网络中，有大量的物理交联作用，这导致它的弹性模量高，驱动过程中易产生力电失稳 (EMI) 现象 [36-37]，这对该类材料的实际应用有很大的阻碍。

从工作原理出发，理想的介电弹性体材料应具有优异的力学性能和介电性能，但传统的介电弹性体材料受本身材料性质的限制，驱动性能不尽人意。因此，研究者们沿着高分子材料设计的思路，致力于制备驱动性能更佳的介电弹性体材料。

瓶刷式介电弹性体 (BBE) 是一种由线性主链和高密度接枝的侧链组成的聚合物，具有一定空间位阻的侧链可以大幅降低线性主链间的交联缠绕密度，通过调控侧链长度、密度和组成基团，可得到不同物理性质的弹性体。并且与传统的预拉伸方式不同，瓶刷式结构可以在分子尺度上实现对聚合物的拉伸，既能够降低杨氏模量又可以在一定程度上克服力电失稳现象，得到较为理想的驱动应变。多伦多大学的刘新宇教授团队 [38] 将单壁碳纳米管引入纯 PDMS 瓶刷状弹性体，通过调控聚合物交联程度 (图 2(a))，得到一种超柔软且导电的瓶刷状弹性体 (图 2(b))，其杨氏模量低于 11 kPa (图 2(c))，并且 PDMS 瓶刷状弹性体在 400% 应变下保持了较好的弹性 (图 2(d))，这对可穿戴型电子设备的实际应用有重要价值。

给弹性体材料施加一个预应变，可以有效提高材料的电击穿场强，但是使用硬质框架的方法缺点显著，而构建互穿型网络结构 (IPN) 既能够避免外部刚性框架带来的影响，在薄膜内部实现预应变，有效抑制驱动时力电失稳现象，又可以有效调控材料力学性能。

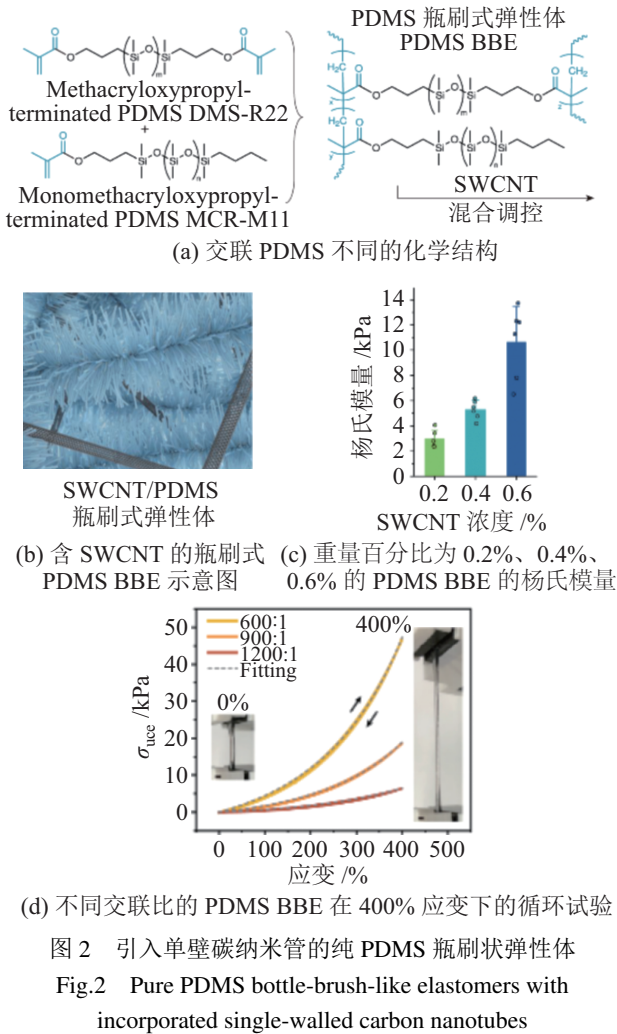


图 2 引入单壁碳纳米管的纯 PDMS 瓶刷状弹性体  
Fig.2 Pure PDMS bottle-brush-like elastomers with incorporated single-walled carbon nanotubes

### 1.2 介电弹性体驱动结构设计

介电弹性体材料被广泛用于设计各类驱动结构与器件。Pei 等<sup>[39]</sup>首先对 VHB 膜进行 400% 的双轴预拉伸, 再将 1,6-己二醇二丙烯酸酯 (HDDA) 溶胀在其中, 高度交联的 HDDA 固化后形成比 VHB 薄膜刚性高的第二个弹性体网络, 撤去 VHB 的外框架支撑后, 第二弹性体网络可以承受 VHB 网络

的收缩, 直到 2 个网络结构都处于平衡状态, 薄膜整体仍然保持一定的预应变 (图 3(a))。并且在这种互穿型网络结构弹性体中, 2 个丙烯酸酯端基之间的柔性己烯段允许聚合物在一定范围内收缩或拉伸, 因此互穿网络结构具有介于 VHB 和 1,6-己二醇二丙烯酸酯之间的应力-应变行为, 调控第二弹性体网络的比重为 18%, 整体薄膜驱动面积高达 233%。该团队又将聚三甲基丙烷三甲基丙烯酸酯 (TMPTMA) 网络引入 400% 双轴预拉伸的 VHB 薄膜中<sup>[40]</sup>, 形成的 IPN 薄膜产生 300% 的最大面积应变 (图 3(c)), 电击穿强度达到 420 V/μm。

根据 Suo 等<sup>[36-37]</sup>提出的介电弹性体驱动机制模型可知, 预拉伸能抑制弹性体内部的力电失稳现象, 有效提高介电弹性体驱动器性能。但是该方法缺点显著, 即使是构建 IPN 介电弹性体, 也需要提前进行预拉伸, 最后撤去外部框架, 整体工艺较为繁琐。因此, 研发无需预拉伸且可在低电压下达到理想驱动面积的介电弹性体材料具有重要意义。

Shi 等<sup>[41]</sup>报道了一种由 2 种链长不同的交联剂构成的双峰分布网络结构介电弹性体材料 (图 4(a)), 这种新型介电弹性体材料被命名为 PHDE (图 4(d))。高分子量的聚氨酯二丙烯酸酯 (CN9021) 为双峰网络中的长链交联剂, 丙氧化新戊二醇二丙烯酸酯 (PNPDA) 为短链交联剂, 调整两种链长的交联剂的交联密度可以调控材料的应力-应变行为和黏弹性 (图 4(b)(c))。并且, 少量的丙烯酸 (AA) 作为共聚物添加到双峰网络中, 它们可以在网络结构中形成少量氢键, 取代部分共价键, 氢键的动态解离可以提升高分子链的流动性, 降低材料的黏弹性。含 10% PNPDA 的 PHDE 无需预拉伸即可达到 189% 的最大面积应变 (图 4(e)), 驱动响应快速且稳定, 击穿场强为 330 V/μm, 在 2 Hz 时 PHDE 仍可以保持 100% 的面积应变 (图 4(f))。

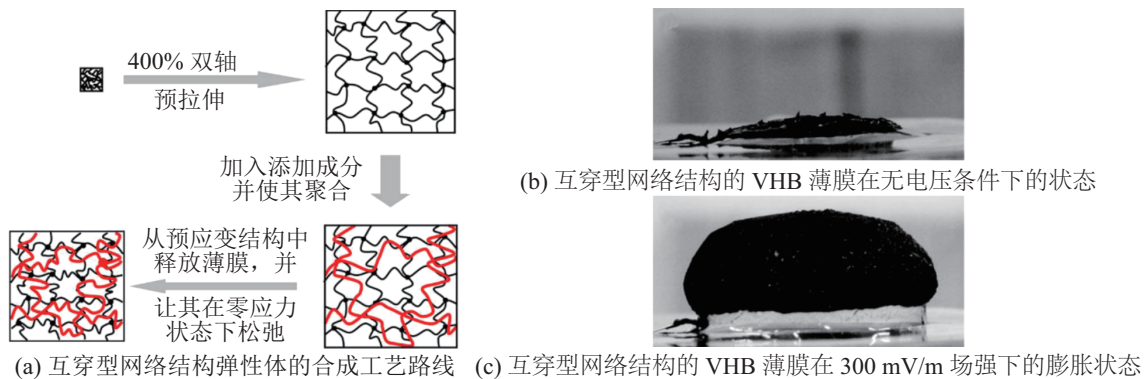


图 3 双轴预拉伸的 VHB 膜  
Fig.3 Biaxially pre-stretched VHB film

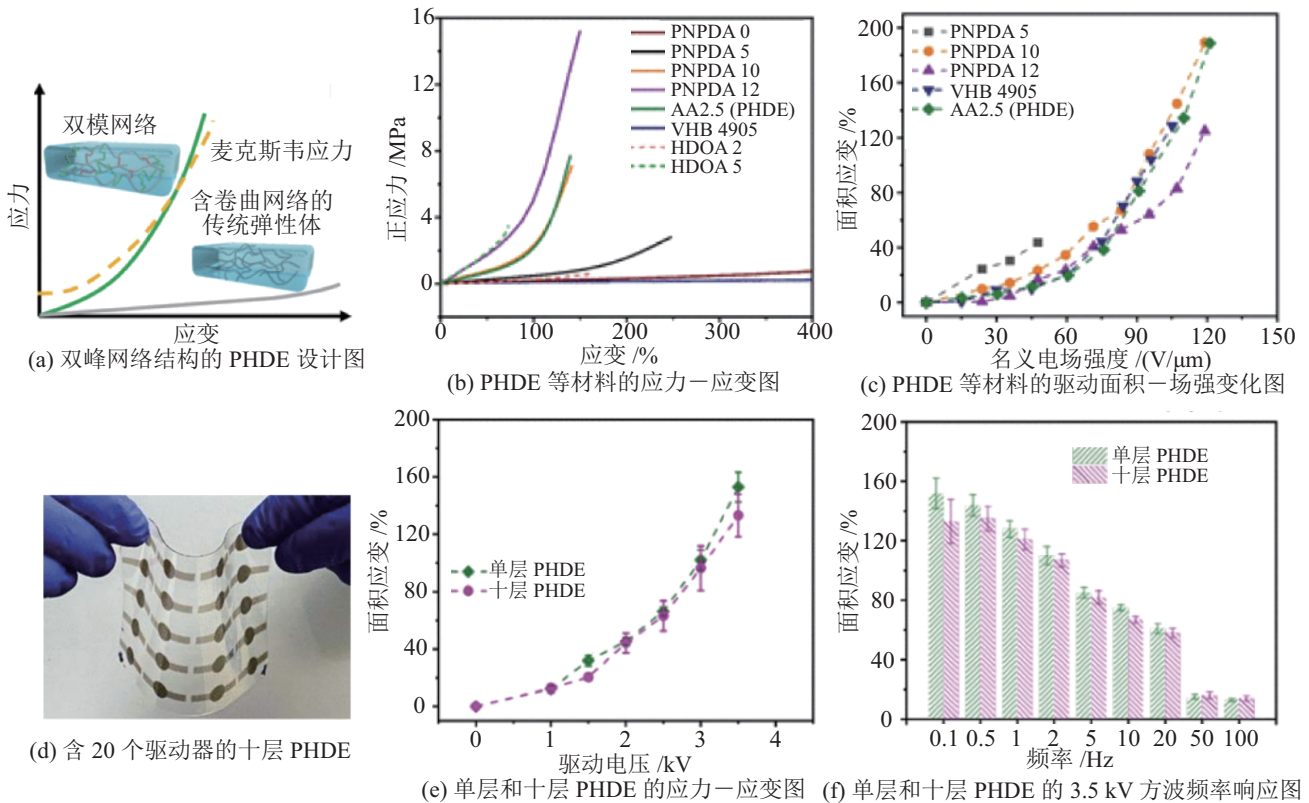


图 4 新型介电弹性体材料被命名为 PHDE

Fig.4 The novel dielectric elastomer material named PHDE

为满足实际应用的不同需求,开发了各种多功能化的介电弹性体材料,例如各向异性型和自修复型等。Luo 等<sup>[42]</sup>利用可逆加成断裂链转移法(RAFT)先制备三嵌段共聚物 SBAS,单轴拉伸后再在 120°C 下应力松弛 4 h,冷却至室温后薄膜收缩得到 24  $\mu\text{m}$  的各向异性介电弹性体薄膜。Opris 等<sup>[43]</sup>采用一步法制备了自修复、高介电常数的介电弹性体材料,含氰丙基的环硅氧烷阴离子通过开环聚合制得具有极性侧链的弹性体材料,通过调控极性侧链基团含量,该介电弹性体材料的介电常数可达 18.1,单层介电弹性体膜在 5.2  $\text{V}/\mu\text{m}$  场强下平面驱动面积为 3.8%。

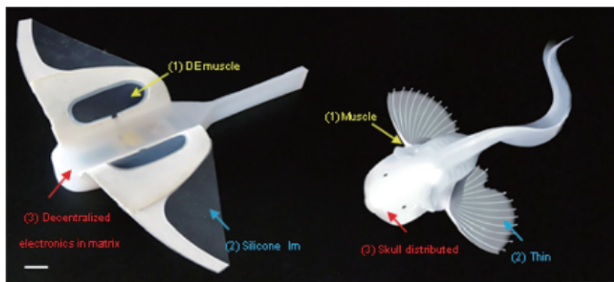
### 1.3 介电弹性体机器人开发

介电弹性体的运动特性与肌肉结构类似,因而基于介电弹性体的仿生机器人得到了广泛的研究。

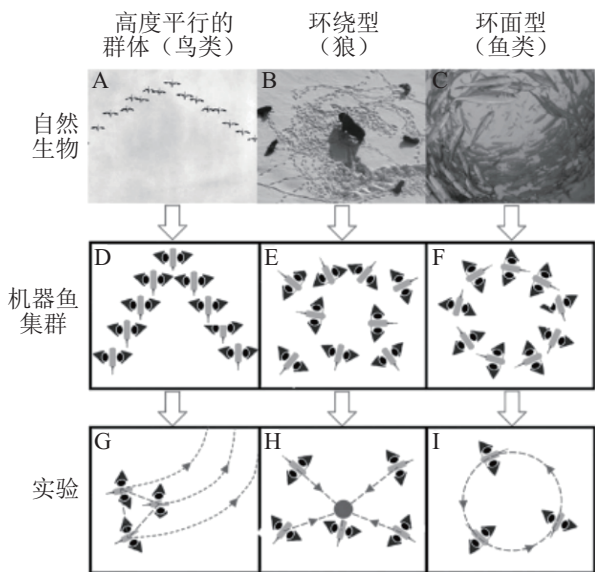
介电弹性体驱动器已广泛应用于水下场景中的各类软体机器人,以实现抓取<sup>[44-47]</sup>、吸附<sup>[48-49]</sup>和游动<sup>[50]</sup>等操作。Li 等<sup>[3]</sup>模仿狮子鱼的身体构造,研制了一种深海机器鱼(图 5(a)),全长 22 cm,翼展 28 cm,由预拉伸的介电弹性体薄膜粘附在弹性框架上驱动鱼鳍的扑动,完成了马里亚纳海沟 10900 m 和中国南海 3224 m 的游动实验测试。

Zhang 等<sup>[51]</sup>采用伺服电机和介电弹性体混合驱动的软体机器鱼,进行了全局视野定位的集群编队研究,模仿了鸟类、狼群和鱼群的集群形式(图 5(b))。

大多数介电弹性体驱动的机器人是基于驱动器的准静态变形来实现运动的,速度一般不是很高。其中介电弹性体的高频振荡特性,尤其是共振特性,有助于移动机器人实现快速运动。研究者们提出了一种基于介电弹性体薄膜振动的仿生机器人,采用喷气推进驱动方式<sup>[52]</sup>(图 6(a))。Ji 等<sup>[53]</sup>设计了一种昆虫大小的机器人,由 3 个在低电压下堆叠的介电弹性体膜驱动,工作电压为 450 V,频率超过 600 Hz(图 6(b))。Tang 等<sup>[54]</sup>提出了一种介电弹性体驱动管道检测机器人,该机器人可以适应不同曲率的管道(图 6(c))。该管道机器人在细窄管道(直径 9.8 mm)中实现了水平和垂直快速运动(水平速度可达 1.19 体长/秒,垂直速度可达 1.08 体长/秒)。基于介电弹性体驱动方式的高频率和高稳定性特点,可望开发出更多的能够适应极端环境的机器人,以进一步发挥其噪声小、适应性强、对损伤不敏感、灵活性高等能力,例如在深海和复杂的飞行环境等应用场景中的柔性机器人。



(a) 深海仿生狮子鱼



(b) 机器鱼群编队

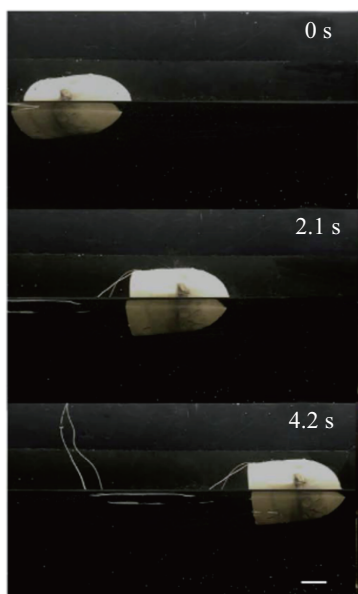
图 5 基于介电弹性体设计的仿生机器鱼

Fig.5 Biomimetic robotic fish designed using dielectric elastomers

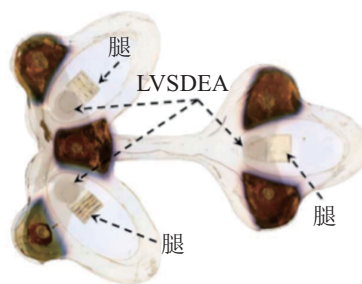
## 2 水凝胶驱动的软体机器人 (Hydrogel-driven soft robot)

水凝胶本质上是吸水膨胀的聚合物网络, 其结构和材料性质依赖于分子间的相互作用。这些多功能材料在技术上很有前景, 因为水凝胶对各种分子具有高渗透性, 且离子电导率较高、生物相容性优异。动物和植物中的生物水凝胶可以动态地适应这些特性, 以响应外部刺激, 实现机械驱动、化学传感和释放、自我修复等。水凝胶是一种通过离子浓度变化, 引入渗透压差, 使水分迁移, 从而实现变形驱动的材料。相比较而言, IPMC、导电聚合物等材料也具有离子迁移导致变形驱动的功能。IPMC 由离子聚合物组成, 通过化学镀层或物理涂层在表面覆盖铂或金等金属导体, 在外部电场作用下使离子迁移和重新分布, 材料发生溶胀变形, 利用镀层电极的不对称配置可以实现弯曲、扭转以及不规则变形。导电聚合物是具有高电导率的高分子材料的统称。然而 IPMC 为金属与高分子聚合物复合的材料, 本身模量较大, 具有不可拉伸性, 一般不定义为软体驱动器, 在软体机器人应用中有较大局限性, 导电聚合物通常用于制作电池、导体和传感器等, 作为驱动器的应用很少, 因此本文不对此类材料作深入讨论。

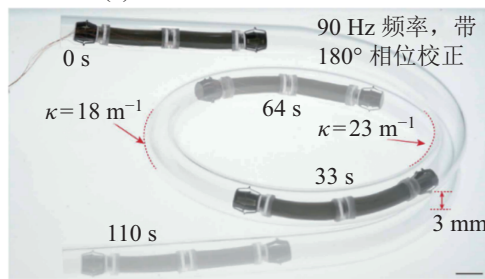
本节主要讨论水凝胶驱动材料, 根据驱动所需的外部刺激类型, 将各种基于水凝胶的刺激响应材料分为 4 类。它们的驱动速率和材料比较见表 2。



(a) 喷气式仿生机器鱼



(b) 仿生高频驱动昆虫机器人



(c) 爬管机器人

图 6 可实现多种不同驱动形式的机器人

Fig.6 Robot capable of achieving different forms of actuation

表2 响应性水凝胶驱动速率和材料对应关系

Tab.2 Correlation between actuation rates of responsive hydrogels and their materials

驱动机制	水凝胶材料	驱动速率	参考文献
电磁场驱动	PAMPS-PAAc	0.80°/s	文 [60]
	PAAc-Al(OH) <sub>3</sub> NP	0.90°/s	文 [62]
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -MWCNT-PNIPAm	0.60°/s	文 [74]
温度场驱动	PNIPAm-TCNCs	4.8°/s	文 [75]
	GO-PDMAEMA	2.7°/s	文 [76]
	Alg-PDMAEMA	5.0°/min	文 [77]
	PNIPAm-PAAc	6.7°/s	文 [78]
光驱动	PEG- $\alpha$ CD-Sti	1.2°/s	文 [79]
	PNIPAm-GO	7.5°/s	文 [80]
	PMAA-POEGMA	1.5°/min	文 [81]
离子渗透压	PAAc	1.6°/s	文 [82]
	PNIPAm-PAAm	0.25°/s	文 [83]
	PVBIPS	2.3°/min	文 [84]
	Alg-PDMAEMA	7.5°/min	文 [77]

### 2.1 电磁场驱动机器人

电响应水凝胶是一类 EAP，在外加电信号（如电压、电流）作用下会发生膨胀或收缩。例如，当施加电压于电响应水凝胶层时，电场会导致水凝胶内部离子分布不均匀，产生渗透压差，从而引起水凝胶层的曲率变化。这些响应变形已经广泛应用于柔性机器人的设计中。

一般而言，水凝胶的电响应性可通过设计带有不同电离官能团的 EAP 来实现。现有的 EAP 包括聚 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸 (PAMPS)<sup>[55]</sup>、聚丙烯酸 (PAAc)<sup>[56]</sup> 和聚 4-羟基丙烯酸丁酯 (poly(4-HBA))<sup>[57-58]</sup>。Yang 等<sup>[59]</sup> 制备了一种新型还原氧化石墨烯/聚 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸-共丙烯酰胺 (rGO/poly(AMPS-co-AAm)) 纳米复合水凝胶，具有快速、显著和可逆的电响应性能 (图 7(a))。Ying 等<sup>[60]</sup> 构建了一种基于 PAMPS 的富集碳纳米管水凝胶，大大提高了水凝胶对电刺激的响应能力。Moschou 等<sup>[61]</sup> 以丙烯酸/丙烯酰胺水凝胶与导电聚

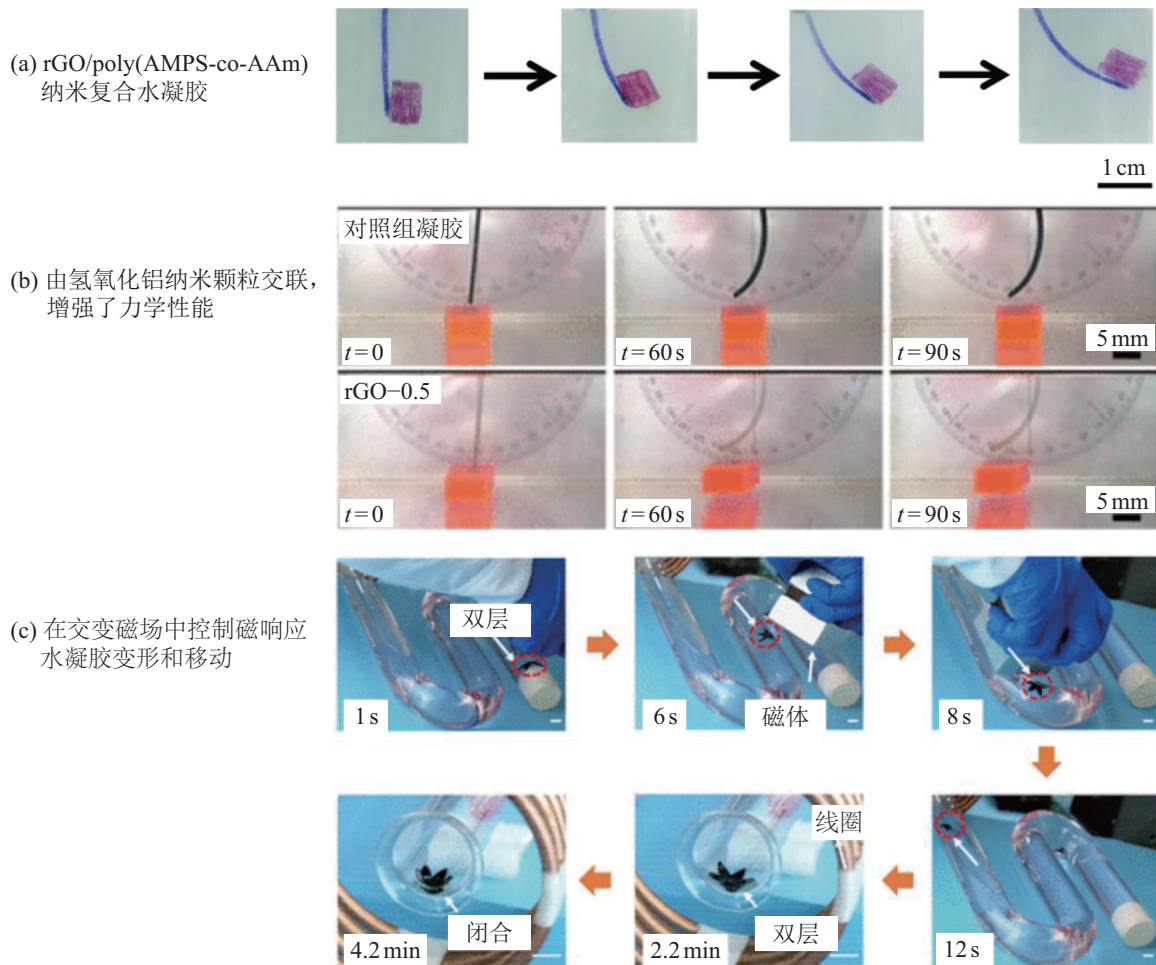


图7 电磁响应水凝胶

Fig.7 Electromagnetic responsive hydrogel

吡咯/炭黑复合材料共混制备了一种新型人工肌肉材料, 且表现出了快速、可逆的电驱动特性。Jiang 等<sup>[62]</sup>开发了一种由氢氧化铝纳米颗粒交联的纳米复合水凝胶驱动器, 机械拉伸强度可达 2 MPa, 可对电刺激作出快速周期性响应(图 7(b))。除了选择不同的 EAP 外, 另一种方法是添加离子化合物来增强水凝胶的电响应性。通过在水凝胶基质中加入离子化合物, 例如氯化锂(LiCl)<sup>[63-64]</sup>和氯化钠(NaCl)<sup>[65]</sup>, 使可移动的离子浓度增大, 从而使水凝胶对外界电场的响应更迅速。电响应水凝胶具有与天然肌肉相似的响应速度快、体积变化率大等特性, 可以用来设计在电刺激条件下工作的生物传感器和人工肌肉。

磁响应水凝胶可以在很短的时间内实现远程驱动, 并且即使在高场强下仍然能够保持良好的生物相容性, 这在某些特定的应用场景中可以发挥重要的作用。水凝胶的磁响应性主要是通过向聚合物基体中加入外部顺磁性添加剂或铁磁性添加剂来实现的, 这使得水凝胶对于磁场的响应非常快速而且变形率较大。在目前的磁响应水凝胶中, 磁性添加剂主要分为 3 种类型: 1) 金属和合金, 如铁(Fe)<sup>[66]</sup>、铁铂纳米颗粒(FePt)<sup>[67]</sup>以及钕合金(NdFeB)<sup>[68]</sup>; 2) 金属氧化物, 如氧化铁(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>[69]</sup>以及氧化亚铁(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)<sup>[70]</sup>; 3) 它们的官能化衍生物。前两种类型的磁性添加剂可以通过物理包裹的形式加入水凝胶网络中。在非均匀磁场作用下, 水凝胶基质中的磁性添加剂作为磁性驱动器, 可以产生与外加磁场强度成正比的力, 从而导致磁性添加剂沿着磁场梯度方向运动, 并带动与其结合的聚合物链驱动水凝胶结构的变形<sup>[71-72]</sup>。Tang 等<sup>[73]</sup>开发了一种在交变磁场中实现磁性水凝胶变形的办法, 并设计了弹性体和磁性 PNIPAm 水凝胶的混合结构, 以实现各种 2D、3D 和折纸结构的机器人在磁场中的运动控制(图 7(c))。

在大多数工作中, 电响应水凝胶模拟了天然肌肉的快速响应和显著体积变化特点, 适用于生物传感器和人工肌肉。磁响应水凝胶可实现远程驱动, 在大强度磁场下保持良好的生物相容性, 可应用于特定场景。

## 2.2 离子渗透压驱动机器人

在溶液中调节 pH 值非常方便, 因此许多 pH 响应水凝胶的研究聚焦在与人体相关的应用上, 如药物递送<sup>[85-86]</sup>、基因传递和生化传感。pH 响应水凝胶的驱动力主要源于 pH 值变化时水凝胶网络的渗透压的差异。这类水凝胶通常由富含弱酸性或碱性

官能团的聚合高分子电解质制备。这些可电离基团作为离子屏障, 只允许带相反电荷的离子通过<sup>[87]</sup>。离子的定向迁移导致了水凝胶基质内部产生渗透压, 从而在溶液环境中为软体机器人提供动力。

根据聚合物网络中电荷的类型, 可以将 pH 响应水凝胶分为酸性和碱性两类。常见的酸性水凝胶包括带有酸性基团的聚合物网络, 如羧基(如 PAAc<sup>[88]</sup>和聚甲基丙烯酸(PMAAc)<sup>[89]</sup>)、磺酸基(如 PAMPS)<sup>[90]</sup>、磷酸基(如聚乙基膦酸(PVPA)<sup>[91]</sup>)或硼酸基(如聚乙烯基苯基硼酸(PVPBA)<sup>[92]</sup>)。碱性水凝胶通常由具有碱性基团的聚合物组成, 如胺或酰胺基团(如 PAAm<sup>[93]</sup>、聚甲基丙烯酸二甲胺乙酯(PDMAEMA)<sup>[94]</sup>、聚二烯基二甲基氯化铵(PDADMAC)<sup>[95]</sup>)。带有酸性或碱性基团的水凝胶依据电离常数(酸性基团为  $K_a$ , 碱性基团为  $K_b$ ) 发生电离, 根据环境 pH 值的变化接收或释放氢离子。对于酸性水凝胶, 当周围 pH 值高于  $pK_a$  时, 酸性基团通过释放氢离子而带更多负电荷, 提升水凝胶的亲水性同时使得聚合物链之间的静电斥力增大, 从而导致水凝胶网络膨胀<sup>[96]</sup>(图 8(a))。同理, 碱性水凝胶中的碱性基团在 pH 值低于  $pK_b$  时吸收氢离子而带正电荷, 这一过程提高了聚合物网络的亲水性, 增加了聚合物链之间的静电斥力, 导致水凝胶的体积膨胀。另一类是两性水凝胶, 它既含有酸性单体, 也含有碱性单体, 如 PMAAc-co-PDMAEMA, 在  $pH < 3$  或  $pH > 5$  时膨胀, 在  $3 < pH < 5$  时发生可逆收缩<sup>[97]</sup>。许多 pH 响应水凝胶已应用于各种医疗设备, 例如 Li 等<sup>[85]</sup>设计了一种混合驱动的软体微机器人用于药物递送, 在不同的 pH 值环境中完成了展开和闭合运动(图 8(b))。Han 等<sup>[86]</sup>制作了一种双层结构的智能胶囊开关来控制药物的释放(图 8(c))。

当溶液的盐度变化时, 盐响应水凝胶会膨胀和收缩, 这一特性在很多水下应用中得以体现。许多 pH 响应水凝胶也具有盐响应性, 其中聚合高分子电解质网络在纯水中膨胀, 在盐溶液中收缩, 这同样归因于水凝胶基质内渗透压的变化。当盐响应水凝胶放置在低盐度溶液中时, 水溶液中可电离基团的电离导致聚合物链上的电荷密度提高, 从而导致水凝胶基质内的分子链间排斥力增大; 而当盐溶液浓度增大时, 聚合物链上的电荷被添加的带有相反电荷的离子中和, 分子链间的斥力减弱, 导致聚合物网络收缩<sup>[96]</sup>(图 8(d))。一般盐响应水凝胶是由两性离子聚合物组成的, 例如聚羧甜菜碱<sup>[98]</sup>和聚 SBMA<sup>[99]</sup>。两性离子聚合物是阴、阳离子基团在同

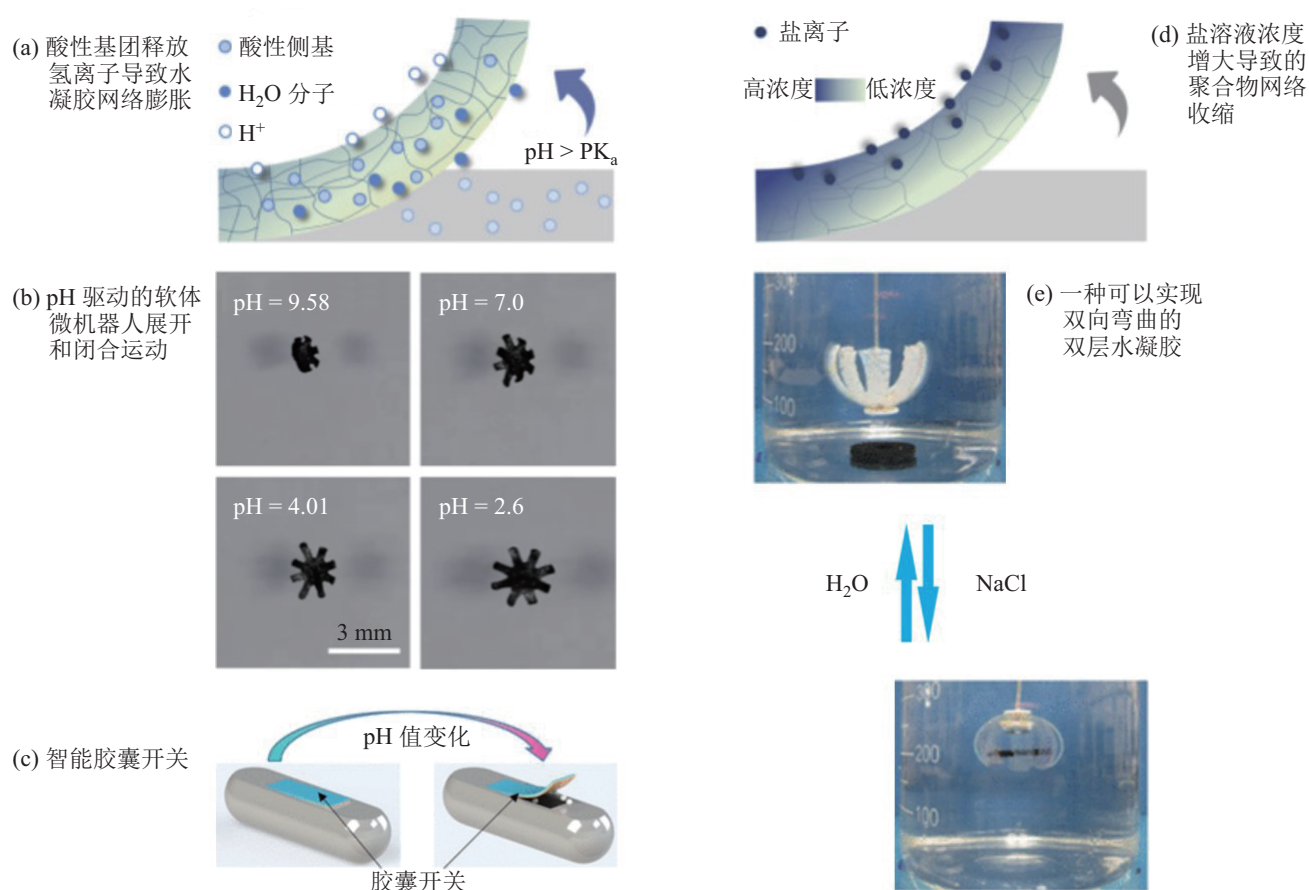


图8 渗透压引起的水凝胶变形

Fig.8 Osmotic pressure-induced deformation of hydrogels

一单体上的一类中性聚合物，其在纯水中的溶解度低于在盐溶液中，这是两性离子链之间的静电相互作用导致的，包括电荷-电荷、电荷-偶极子、偶极子-偶极子之间的相互作用。在盐溶液中，加入的溶质通过分别结合带相反电荷的基团，减弱链间和链内的吸引力来提高溶解度，从而导致体积膨胀<sup>[100]</sup>。两性离子聚合物的盐响应性可以通过加入不同类型和浓度的盐来调节<sup>[101]</sup>。两性离子聚合物由于表现出良好的生物相容性，在生物医学和生物工程设备（如生物传感器<sup>[102-103]</sup>和免疫测定系统<sup>[104-105]</sup>）中应用十分广泛。

一些盐响应水凝胶驱动器由具有聚合高分子电解质层和两性离子聚合物层的双层结构组成。聚合高分子电解质和两性离子聚合物在纯水和盐溶液中具有相反的反应行为，可以实现2个方向的弯曲<sup>[106]</sup>，Xiao等<sup>[107]</sup>将带有阳离子的聚合高分子电解质（polyMETAC/HEAA）层和两性离子聚合物（polyVBIPS）层组装在一起，设计并合成了一种双层水凝胶（图8(e)）。

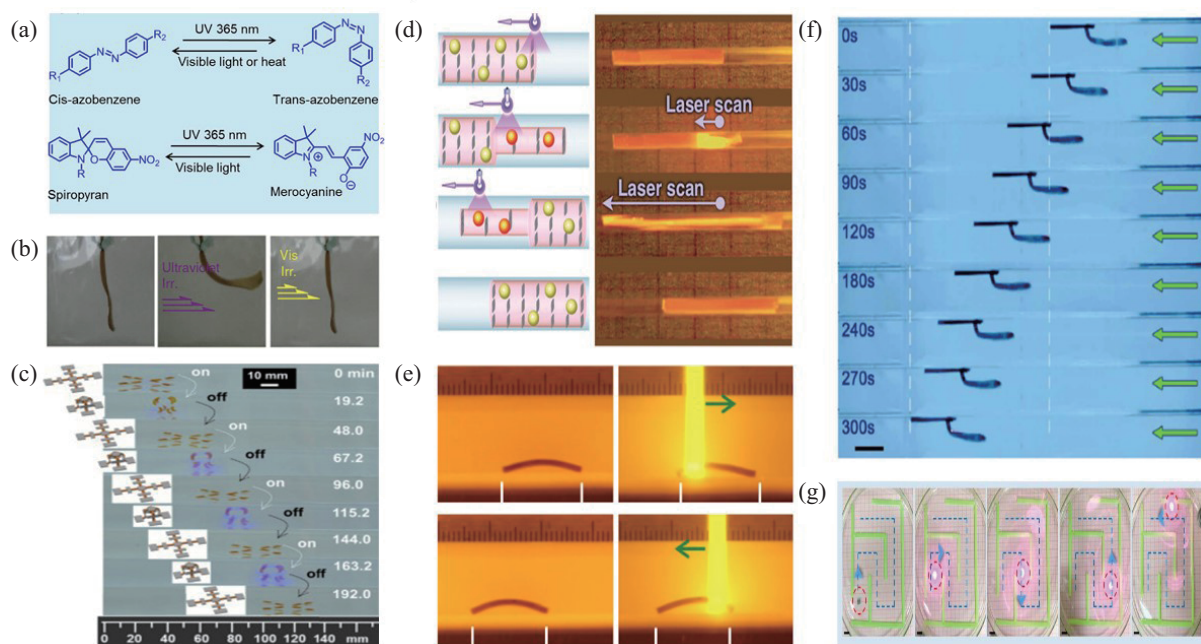
pH 响应水凝胶在药物递送和生化传感等领域

有广泛应用，而盐响应水凝胶在水下环境中表现出优越性能。

### 2.3 光驱动机器人

光响应水凝胶采用非接触驱动方式，具有可远程控制 and 可编程控制的优点。在光照条件下，其网络会发生物理或化学变化，导致不同程度的膨胀或收缩。光响应机制包括光化学效应和光热效应。

光化学效应是指水凝胶中含有基于光反应的光敏基团，这些基团在不同光照条件下产生光异构化。光异构化是指水凝胶中的三重态光敏剂从稳定状态转变为不稳定状态或由基态转变为激发态。许多分子如偶氮苯及其衍生物或螺吡喃及其衍生物都可以引起这种反应<sup>[108-109]</sup>。当这些基团受到相应波长的光辐照时，内部电子会发生跃迁，使分子轨道进入激发态，并通过分子间和分子内势能的转移产生可逆异构化。例如，在可见光下，偶氮苯保持反式形式，在紫外光下则转变为顺式形式<sup>[110]</sup>（图9(a)）。这种异构化会导致聚合物链的交联密度和长度的变化，从而使水凝胶因疏水性改变而发生体积变化<sup>[111]</sup>。Takashima等<sup>[112]</sup>设计了一种光响应驱动



(a) 光异构化, 偶氮苯及螺吡喃; (b) 光化学变形弯曲驱动器; (c) 光化学变形类折纸爬行机器人; (d) 光热变形仿尺蠖爬行机器人; (e) 光热变形多模式机器人; (f) 光热变形自振荡游泳机器人; (g) 在水面移动的光热变形仿生昆虫

图 9 光响应水凝胶软体机器人

Fig.9 Soft robots based on light-responsive hydrogel

机器人。以  $\alpha$ -环糊精为主体分子、偶氮苯衍生物为光响应客体分子的光响应超分子水凝胶在 365 nm 紫外光或 430 nm 可见光照射下, 在尺寸和形状上都表现出可逆的宏观形变, 将伸长和缩短特性的层板组合起来则可以发生弯曲变形 (图 9(b))。螺吡喃在紫外光照射下会发生解离, 在可见光<sup>[113]</sup>作用下则会转变为环状闭合结构 (图 9(a))。Li 等<sup>[114]</sup>报道了光活性双层驱动器的分子设计, 该驱动器可以对可见光做出快速响应, 实现可编程的类折纸结构变形, 并模仿尺蠖和章鱼的运动 (图 9(c))。

光热效应法是一种利用掺杂在水凝胶中的光热剂将光能转化为热能, 从而引起温敏水凝胶的受热变形的办法。为了提高光热转换效率, 通常会在光热水凝胶中掺杂纳米金、氧化石墨烯、碳纳米管和磁铁矿纳米颗粒等物质<sup>[115-119]</sup>。其中光热剂会吸收特定波长的光, 并将其转化为热能, 使得水凝胶内部的温度升高。温度改变可能导致体积相转变。对于具有低临界溶液温度 (LCST) 的温敏水凝胶, 其在温度低于 LCST 时表现为亲水性, 而高于 LCST 时表现为疏水性。水凝胶高分子网络的相转变使得水凝胶中的水分大量出入其中 (温度升高时失水, 降低时吸水), 从而使得水凝胶产生体积等形态变化。Sun 等<sup>[116]</sup>将金纳米颗粒和钛酸盐纳米片加入热响应水凝胶体系, 制备出在可见光激光的

照射下, 能够迅速 (不到 0.5 s) 产生大变形 (其原始长度的 80%) 的光响应水凝胶。它不仅能实现蠕虫爬行运动, 而且还能逆转其方向 (图 9(d))。Zhu 等<sup>[115]</sup>制备出了图案化的各向异性水凝胶, 具备程序化的变形能力; 进而, 制作出能够实现多种运动模式且运动方向可控的仿生软体机器人 (图 9(e))。Zhao 等<sup>[120]</sup>报道了一种具有自振荡效应的水凝胶机器人, 能够在高阻尼系数的流体中完成任意方向运动 (图 9(e))。该机器人所具有的自振荡行为是由内在的负反馈回路产生的, 该回路来自于光源与机器人材料动态作用过程。由于驱动器具有高输出力, 该机器人可以在高阻尼流体中快速游动, 速度可达 1.15 体长/分钟 (图 9(f))。Chen 等<sup>[121]</sup>将天然竹片与苯胺黑/聚 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM) 复合水凝胶结合, 开发了一种新型的复合水凝胶驱动器, 能够进行高效光热转换, 实现远程可控的光响应驱动; 并制作出一种基于 Marangoni 效应在水面上精准快速运动的仿生昆虫 (图 9(g))。

光响应水凝胶具有优异的光化学和光热效应, 有助于提高机器人的性能。这些材料的变形特性和对外部光的敏感性, 使得机器人能够实现远程控制、可编程运动和多样形态变化。

#### 2.4 温度场驱动机器人

温度响应水凝胶材料在响应水凝胶中属于常见

类型，其局部含水量随温度变化而变化，因而通过调节环境温度可以引发其形变。典型的温度响应水凝胶材料的形变通常是各向同性的，因此需要设计梯度结构或添加被动层以限制特定方向上的变形，从而实现定向的变形。

温度响应的主要机制之一是 LCST 响应。LCST 响应的基本原理是在温度变化时水凝胶网络中的疏水和亲水基团以及溶剂分子之间会达到动态热力学平衡<sup>[122]</sup>。Bac 等<sup>[123]</sup>探究了温度对于 PNIPAAm 与其他丙烯酰胺类水凝胶溶胀变形的影响，并基于水凝胶网络中存在的分子间作用力对水凝胶的 LCST 响应行为作出了解释。例如，丙烯酰胺类水凝胶中的酰胺基形成的氢键可以生成水笼，从而保持疏水链段的水合状态。然而，当温度超过临界温度时，由于热力学代价巨大，水笼崩溃，导致水分子被挤出水凝胶网络。其他的温度响应机理，例如高临界溶液温度 (USCT)<sup>[124-125]</sup>机理，由于溶胀行为极大地受环境酸碱度的影响，目前应用得比较少。

常见的温度响应型水凝胶驱动方式有双层结构驱动和梯度结构驱动。由于内外两层对温度激励的响应不同，单侧的溶胀或收缩会导致整体结构发生弯曲变形。Cheng 等<sup>[126]</sup>提出了一种由温度响应和 pH 响应水凝胶构成，表现出快速、可逆和可重复

的弯曲运动的软结构。同时，研究人员还引入了光敏香豆素为驱动器添加了荧光特性。针对环境温度的变化，基于该结构设计的抓取装置在 45°C 的温水中需要 15 s 完成目标物体抓取，在 15°C 的水中需要 30 s 完成目标物体的释放，抓手最大可以抓取自身质量 5 倍的物体 (图 10(a))。Liu 等<sup>[127]</sup>提出了一种各向异性溶胀的热响应双层水凝胶驱动器，通过在内侧层掺杂聚乙烯醇与水凝胶微球来改变两层的溶胀率与溶胀速率，使结构在 103°C 温度下弯曲速度高达 50°/s。基于该驱动原理，研究者设计了抓手、花朵与微流控阀等一系列柔性机器 (图 10(b))。Asoh 等<sup>[128]</sup>利用电泳现象在水凝胶网络中制造二氧化硅微粒和孔洞的梯度，开发了 2 种纳米结构梯度水凝胶。通过改变电泳条件可以比较容易地控制梯度比，从而调节水凝胶材料的驱动性能 (图 10(c))。Yao<sup>[129]</sup>报道了一种 PNIPAAm - 黏土纳米复合水凝胶，该水凝胶的溶胀速率与溶胀率可通过调节黏土颗粒的浓度与黏土纳米复合水凝胶层的厚度来调节。基于该种水凝胶制作的双层驱动器，不仅具有良好的弯曲动作功能，同时克服了纯水凝胶材料机械性能欠缺的薄弱点 (图 10(d))，说明调节温度响应水凝胶中的溶胀速率和溶胀率也是实现驱动器功能的策略之一。

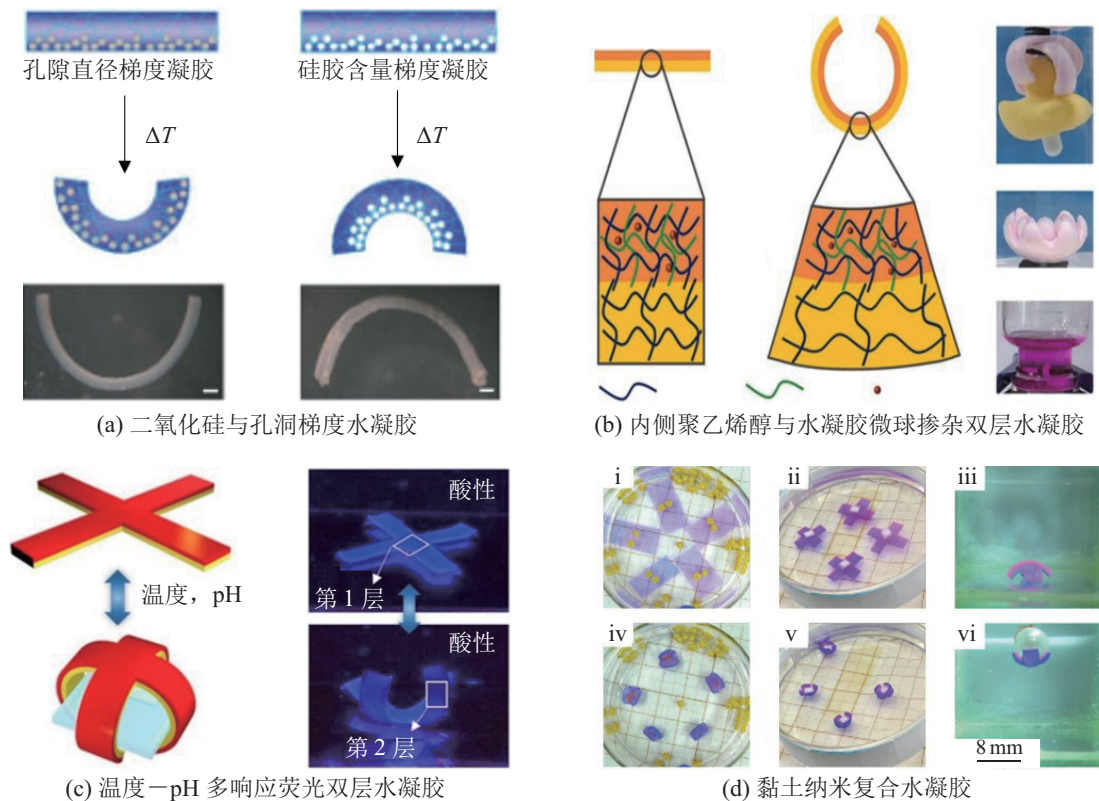


图 10 双层结构驱动与梯度结构驱动

Fig. 10 Bilayer structure actuation and gradient structure actuation

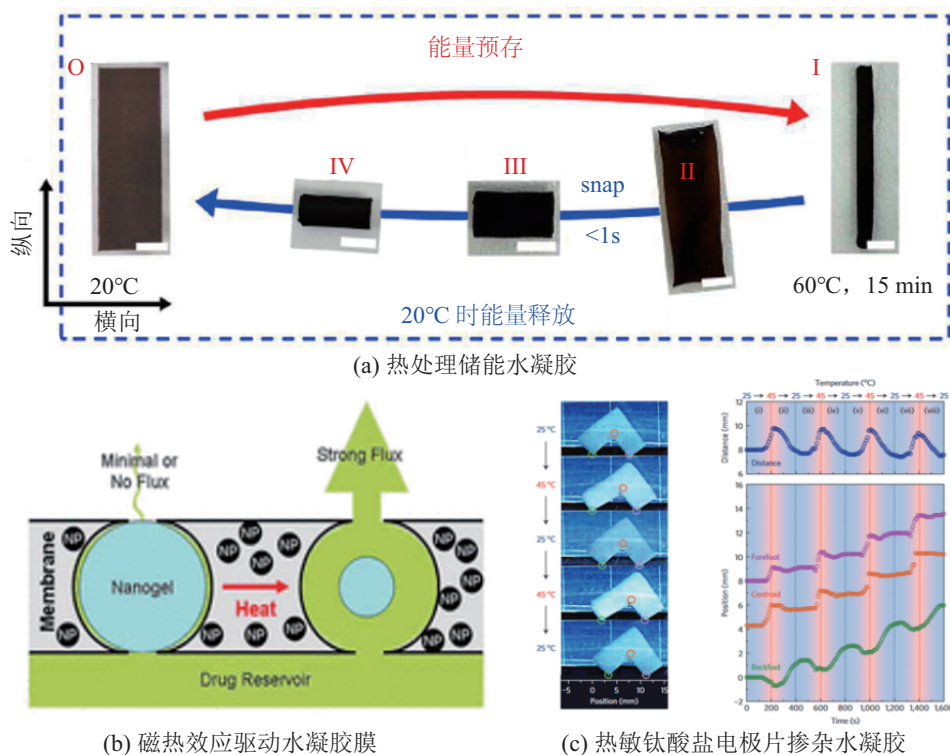


图 11 其他温度响应水凝胶

Fig.11 Other temperature-responsive hydrogels

其他的一些温度响应水凝胶驱动结构利用了不同的温敏效应进行驱动。Fan 等<sup>[130]</sup>利用热处理给薄片水凝胶增加预变形,使薄片在 20°C 的水中溶胀时产生可编程的顺序变形,并以该原理为基础制造了一类柔性驱动器(图 11(a))。Hoare 等<sup>[131]</sup>设计了一类基于 PNIPAAm 可通过磁热效应控制药物通量的纳米水凝胶膜。外加的振荡磁场使磁纳米颗粒感应生热,从而改变水凝胶膜周围的环境温度,最终导致纳米凝胶收缩并允许药物从装置中扩散出来。当磁场关闭时,纳米凝胶重新膨胀并填充膜孔(图 11(b))。Kim 等<sup>[132]</sup>开发了一种利用温度改变导电纳米片之间的介电常数从而产生变形的的水凝胶驱动器。在制作驱动器时,钛酸盐纳米片被磁化后共面固化于水凝胶结构中,随着温度升高至 LCST 以上,水分子被排出从而导致金属片间介电常数变化,静电排斥变强,使水凝胶在垂直于钛酸盐纳米片平面的方向上膨胀,呈现出与一般温度效应相反的膨胀现象(图 11(c))。

### 3 结论与展望 (Conclusion and outlook)

目前,介电弹性体和水凝胶作为驱动材料已被用于诸多软体机器人的开发中。介电弹性体作为电子型电活性聚合物,驱动方式简单,只需要施加电压就可以迅速产生较大的形变,并且与传统驱动

方式相比,介电弹性体驱动能耗更小,这使得介电弹性体在人工肌肉领域的应用前景广阔。然而,当前传统材料如硅橡胶类、聚氨酯类和丙烯酸酯类介电弹性体在能量密度、驱动速度、稳定性等方面仍存在不足。水凝胶驱动器作为一种高含水量的软体材料,通过化学合成调节其机械和化学性质,能够模拟许多种生物组织且具有良好的生物相容性。同时,水凝胶可以响应多种刺激,除了电场,在温度、光、pH 值变化等多种刺激下均可变形。这种独特的材料性质,使得水凝胶驱动器在许多实际应用中具有潜力,如生物传感器、人工肌肉、药物输送系统和远程控制系统。然而,如何提高响应速度和材料强度,如何提高可逆性以及复杂环境中的稳定性等一系列问题仍然是水凝胶驱动器投入工程应用的阻碍。此外,实现对水凝胶驱动器的精确控制以适应更多的应用环境,也是一大挑战。

在未来,新型结构的驱动器如何实现量产,并优化其物理化学性质以适应更多应用场景还有待进一步研究。同时,更具挑战性的是如何设计出无需预拉伸就能在低电压下达到理想驱动面积的介电弹性体材料,这需要从分子设计、高分子合成和材料工艺等多方面进行深入研究和探讨。此外,为了更好地推动水凝胶驱动器的实际应用,还需要进一步研究其材料内部响应机制。更有效的制备和加工技

术, 以及更多的实际应用领域还需继续探索。尤其是在医疗领域, 如何设计和制造能够在复杂生物环境中有效工作的水凝胶驱动器, 将会是一个有待解决的重要问题。

总体来看, 软体机器人的离子/电响应驱动材料及结构研究是一个充满挑战和机遇的领域, 期待在未来的研究中看到更多的突破和应用。

### 参考文献 (References)

- [1] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
- [2] KATZSCHMANN R K, DELPRETO J, MACCURDY R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(16). DOI: 10.1126/scirobotics.aar3449.
- [3] LI G R, CHEN X P, ZHOU F H, et al. Self-powered soft robot in the Mariana Trench[J]. *Nature*, 2021, 591(7848): 66-71.
- [4] NGUYEN D Q, HO V A. Anguilliform swimming performance of an eel-inspired soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2022, 9(3): 425-439.
- [5] ZHANG C W, ZOU W F, YU H C, et al. Manta ray inspired soft robot fish with tough hydrogels as structural elements[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(46): 52430-52439.
- [6] LIU Q, ZUO J, ZHU C, et al. Design and control of soft rehabilitation robots actuated by pneumatic muscles: State of the art[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 113: 620-634.
- [7] WANG Y X, XU Q S. Design and testing of a soft parallel robot based on pneumatic artificial muscles for wrist rehabilitation[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1). DOI: 10.1038/s41598-020-80411-0.
- [8] PAN M, YUAN C G, LIANG X R, et al. Soft actuators and robotic devices for rehabilitation and assistance[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(4). DOI: 10.1002/aisy.202100140.
- [9] HUGHES J, CULHA U, GIARDINA F, et al. Soft manipulators and grippers: A review[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2016, 3. DOI: 10.3389/frobt.2016.00069.
- [10] ZHOU L, REN L L, CHEN Y, et al. Bio-inspired soft grippers based on impactive gripping[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(9). DOI: 10.1002/advs.202002017.
- [11] CHEN X Q, ZHANG X, HUANG Y Y, et al. A review of soft manipulator research, applications, and opportunities[J]. *Journal of Field Robotics*, 2022, 39(3): 281-311.
- [12] WU M X, ZHENG X W, LIU R S, et al. Glowing sucker octopus (*Stauroteuthis syrtensis*)-inspired soft robotic gripper for underwater self-adaptive grasping and sensing[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(17). DOI: 10.1002/advs.202104382.
- [13] SCHEGG P, DURIEZ C. Review on generic methods for mechanical modeling, simulation and control of soft robots[J]. *PLOS ONE*, 2022, 17(1). DOI: 10.1371/journal.pone.0251059.
- [14] ARMANINI C, BOYER F, MATHEW A T, et al. Soft robots modeling: A structured overview[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(3): 1728-1748.
- [15] MIRVAKILI S M, HUNTER I W. Artificial muscles: Mechanisms, applications, and challenges[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(6). DOI: 10.1002/adma.201704407.
- [16] ROMASANTA L J, LOPEZ-MANCHADO M A, VERDEJO R. Increasing the performance of dielectric elastomer actuators: A review from the materials perspective[J]. *Progress in Polymer Science*, 2015, 51: 188-211.
- [17] MAKSIMKIN A V, DAYYOUB T, TELYSHEV D V, et al. Electroactive polymer-based composites for artificial muscle-like actuators: A review[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(13). DOI: 10.3390/nano12132272.
- [18] DUDUTA M, HAJIESMAILI E, ZHAO H, et al. Realizing the potential of dielectric elastomer artificial muscles[J]. *PNAS*, 2019, 116(7): 2476-2481.
- [19] HUANG J S, LI T F, FOO C C, et al. Giant, voltage-actuated deformation of a dielectric elastomer under dead load[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(4): 041911. DOI: 10.1063/1.3680591.
- [20] QIU Y, ZHANG E, PLAMTHOTTAM R, et al. Dielectric elastomer artificial muscle: Materials innovations and device explorations[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2019, 52(2): 316-325.
- [21] CHEN Y F, ZHAO H C, MAO J, et al. Controlled flight of a microrobot powered by soft artificial muscles[J]. *Nature*, 2019, 575(7782): 324-329.
- [22] REN Z J, KIM S, JI X, et al. A high-lift micro-aerial-robot powered by low-voltage and long-endurance dielectric elastomer actuators[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(7). DOI: 10.1002/adma.202106757.
- [23] WU S, BAKER G L, YIN J, et al. Fast thermal actuators for soft robotics[J]. *Soft Robotics*, 2022, 9(6): 1031-1039.
- [24] LI D F, WANG S, HE J H, et al. Bioinspired ultrathin piecewise controllable soft robots[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(5). DOI: 10.1002/admt.202001095.
- [25] AOURAGHE M A, ZHOU M J, QIU Y P, et al. Low-voltage activating, fast responding electro-thermal actuator based on carbon nanotube film/PDMS composites[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2021, 3(1): 38-46.
- [26] VUDAYAGIRI S, ZAKARIA S, YU L, et al. High breakdown-strength composites from liquid silicone rubbers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(10). DOI: 10.1088/0964-1726/23/10/105017.
- [27] LIU H L, ZHANG L Q, YANG D, et al. Mechanical, dielectric, and actuated strain of silicone elastomer filled with various types of TiO<sub>2</sub>[J]. *Soft Materials*, 2013, 11(3): 363-370.
- [28] ROMASANTA L J, LERET P, CASABAN L, et al. Towards materials with enhanced electro-mechanical response: CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>-polydimethylsiloxane composites[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(47): 24705-24712.
- [29] BIGGS J, DANIELMEIER K, HITZBLECK J, et al. Electroactive polymers: Developments of and perspectives for dielectric elastomers[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(36): 9409-9421.
- [30] SHANKAR R, GHOSH T K, SPONTAK R J. Electromechanical response of nanostructured polymer systems with no mechanical pre-strain[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2007, 28(10): 1142-1147.
- [31] PELRINE R, KORNBLUH R, PEI Q, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%[J]. *Science*, 2000, 287(5454): 836-839.

- [32] WANG Y Z, ZHANG P P, HUANG H, et al. Bio-inspired transparent soft jellyfish robot[J]. *Soft Robotics*, 2023, 10(3): 590-600.
- [33] YANG Y L, LI D F, SUN Y H, et al. Muscle-inspired soft robots based on bilateral dielectric elastomer actuators[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9(1). DOI: 10.1038/s41378-023-00592-2.
- [34] THONGKING W, WIRANATA A, MINAMINOSONO A, et al. Soft robotic gripper based on multi-layers of dielectric elastomer actuators[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2021, 33(4): 968-974.
- [35] TAN M W M, THANGAVEL G, LEE P S. Rugged soft robots using tough, stretchable, and self-healable adhesive elastomers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(34). DOI: 10.1002/adfm.202103097.
- [36] ZHAO X H, SUO Z G. Theory of dielectric elastomers capable of giant deformation of actuation[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(17-30). DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.178302.
- [37] SUO Z G. Theory of dielectric elastomers[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 23(6): 549-578.
- [38] XU P F, WANG S J, LIN A, et al. Conductive and elastic bottlebrush elastomers for ultrasoft electronics[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1). DOI: 10.1038/s41467-023-36214-8.
- [39] HA S M, YUAN W, PEI Q, et al. Interpenetrating polymer networks for high-performance electroelastomer artificial muscles[J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(7): 887-891.
- [40] HA S M, YUAN W, PEI Q, et al. Interpenetrating networks of elastomers exhibiting 300% electrically-induced area strain[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2): S280-S287.
- [41] SHI Y, ASKOUNIS E, PLAMTHOTTAM R, et al. A processable, high-performance dielectric elastomer and multilayering process[J]. *Science*, 2022, 377(6602): 228-232.
- [42] HE J, CHEN Z Q, XIAO Y H, et al. Intrinsically anisotropic dielectric elastomer fiber actuators[J]. *ACS Materials Letters*, 2022, 4(3): 472-479.
- [43] VON SZCZEPANSKI J, DANNER P M, OPRIS D M. Self-healable, self-repairable, and recyclable electrically responsive artificial muscles[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(22). DOI: 10.1002/advs.202202153.
- [44] STUART H S, WANG S, CUTKOSKY M R. Tunable contact conditions and grasp hydrodynamics using gentle fingertip suction[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, 35(2): 295-306.
- [45] VOGT D M, BECKER K P, PHILLIPS B T, et al. Shipboard design and fabrication of custom 3D-printed soft robotic manipulators for the investigation of delicate deep-sea organisms [J]. *PLOS ONE*, 2018, 13(8). DOI: 10.1371/journal.pone.0200386.
- [46] PHILLIPS B T, BECKER K P, KURUMAYA S, et al. A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate deep-sea biological exploration[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1). DOI: 10.1038/s41598-018-33138-y.
- [47] GALLOWAY K C, BECKER K P, PHILLIPS B, et al. Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(1): 23-33.
- [48] SANDOVAL J A, JADHAV S, QUAN H, et al. Reversible adhesion to rough surfaces both in and out of water, inspired by the clingfish suction disc[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(6). DOI: 10.1088/1748-3190/ab47d1.
- [49] WANG Y, YANG X, CHEN Y, et al. A biorobotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish [J]. *Science Robotics*, 2017, 2(10). DOI: 10.1126/scirobotics.aan8072.
- [50] LASCHI C, CIANCHETTI M, MAZZOLAI B, et al. Soft robot arm inspired by the octopus[J]. *Advanced Robotics*, 2012, 26(7): 709-727.
- [51] ZHANG Z, YANG T, ZHANG T H, et al. Global vision-based formation control of soft robotic fish swarm[J]. *Soft Robotics*, 2021, 8(3): 310-318.
- [52] TANG C, MA W T, LI B, et al. Cephalopod-inspired swimming robot using dielectric elastomer synthetic jet actuator[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22(4). DOI: 10.1002/adem.201901130.
- [53] JI X, LIU X, CACUCCILOLO V, et al. An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(37). DOI: 10.1126/scirobotics.aaz6451.
- [54] TANG C, DU B Y, JIANG S W, et al. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(66). DOI: 10.1126/scirobotics.abm8597.
- [55] OSADA Y. Chemical valves and gel actuators[J]. *Advanced Materials*, 1991, 3(2): 107-108.
- [56] KIM S J, KIM H I, PARK S J, et al. Behavior in electric fields of smart hydrogels with potential application as bio-inspired actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(4): 511-514.
- [57] KWON G H, PARK J Y, KIM J Y, et al. Biomimetic soft multifunctional miniature aquabots[J]. *Small*, 2008, 4(12): 2148-2153.
- [58] KWON G H, CHOI Y Y, PARK J Y, et al. Electrically-driven hydrogel actuators in microfluidic channels: Fabrication, characterization, and biological application[J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(12): 1604-1610.
- [59] YANG C, LIU Z, CHEN C, et al. Reduced graphene oxide-containing smart hydrogels with excellent electro-response and mechanical properties for soft actuators[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(18): 15758-15767.
- [60] YING Z R, WANG Q, XIE J, et al. Novel electrically-conductive electro-responsive hydrogels for smart actuators with a carbon-nanotube-enriched three-dimensional conductive network and a physical-phase-type three-dimensional interpenetrating network[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(12): 4192-4205.
- [61] MOSCHOU E A, PETEU S F, BACHAS L G, et al. Artificial muscle material with fast electroactuation under neutral pH conditions[J]. *Chemistry of Materials*, 2004, 16(12): 2499-2502.
- [62] JIANG H Y, FAN L X, YAN S, et al. Tough and electro-responsive hydrogel actuators with bidirectional bending behavior[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(5): 2231-2237.
- [63] KIM C C, LEE H H, OH K H, et al. Highly stretchable, transparent ionic touch panel[J]. *Science*, 2016, 353(6300): 682-687.
- [64] LI T F, LI G R, LIANG Y M, et al. Fast-moving soft electronic fish[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4). DOI: 10.1126/sciadv.1602045.

- [65] KIM S J, SHIN S R, LEE J H, et al. Electrical response characterization of chitosan/polyacrylonitrile hydrogel in NaCl solutions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 90(1): 91-96.
- [66] SHANKAR A, SAFRONOV A P, MIKHNEVICH E A, et al. Multidomain iron nanoparticles for the preparation of polyacrylamide ferrogels[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 431: 134-137.
- [67] ZHANG Y, WANG Q. Magnetic-plasmonic dual modulated FePt-Au ternary heterostructured nanorods as a promising nanobioprobe[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(18): 2485-2490.
- [68] KIM Y, YUK H, ZHAO R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials[J]. *Nature*, 2018, 558(7709): 274-279.
- [69] ROEDER L, BENDER P, TSCHÖPE A, et al. Shear modulus determination in model hydrogels by means of elongated magnetic nanoprobess[J]. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 2012, 50(24): 1772-1781.
- [70] ZRÍNYI M, BARSÍ L, BÜKI A. Deformation of ferrogels induced by nonuniform magnetic fields[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1996, 104(21): 8750-8756.
- [71] ZHAO X, KIM J, CEZAR C A, et al. Active scaffolds for on-demand drug and cell delivery[J]. *PNAS*, 2011, 108(1): 67-72.
- [72] LI Y H, HUANG G Y, ZHANG X H, et al. Magnetic hydrogels and their potential biomedical applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(6): 660-672.
- [73] TANG J D, YIN Q F, QIAO Y C, et al. Shape morphing of hydrogels in alternating magnetic field[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(23): 21194-21200.
- [74] KUO J C, HUANG H W, TUNG S W, et al. A hydrogel-based intravascular microgripper manipulated using magnetic fields [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 211: 121-130.
- [75] MO K W, HE M, CAO X D, et al. Direct current electric field induced gradient hydrogel actuators with rapid thermo-responsive performance as soft manipulators[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(8): 2756-2763.
- [76] FAN W X, SHAN C Y, GUO H Y, et al. Dual-gradient enabled ultrafast biomimetic snapping of hydrogel materials[J]. *Science Advances*, 2019, 5(4). DOI: 10.1126/sciadv.aav7174.
- [77] ZHOU S Z, WU B Y, ZHOU Q, et al. Ionic strength and thermal dual-responsive bilayer hollow spherical hydrogel actuator[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2020, 41(8). DOI: 10.1002/marc.201900543.
- [78] LIN H J, MA S H, YU B, et al. Fabrication of asymmetric tubular hydrogels through polymerization-assisted welding for thermal flow actuated artificial muscles[J]. *Chemistry of Materials*, 2019, 31(12): 4469-4478.
- [79] IKEJIRI S, TAKASHIMA Y, OSAKI M, et al. Solvent-free photoresponsive artificial muscles rapidly driven by molecular machines[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(49): 17308-17315.
- [80] YANG Y, TAN Y, WANG X L, et al. Photothermal nanocomposite hydrogel actuator with electric-field-induced gradient and oriented structure[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(9): 7688-7692.
- [81] JIANG Z, TAN M L, TAHERI M, et al. Strong, self-healable, and recyclable visible-light-responsive hydrogel actuators[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(18): 7049-7056.
- [82] ZHAO L, HUANG J H, ZHANG Y C, et al. Programmable and bidirectional bending of soft actuators based on Janus structure with sticky tough PAA-clay hydrogel[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(13): 11866-11873.
- [83] SUN P, ZHANG H, XU D, et al. Super tough bilayer actuators based on multi-responsive hydrogels crosslinked by functional triblock copolymer micelle macro-crosslinkers[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7(16): 2619-2625.
- [84] XIAO S W, REN B P, HUANG L, et al. Salt-responsive zwitterionic polymer brushes with anti-polyelectrolyte property[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2018, 19: 86-93.
- [85] LI H, GO G, KO S Y, et al. Magnetic actuated pH-responsive hydrogel-based soft micro-robot for targeted drug delivery[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(2). DOI: 10.1088/0964-1726/25/2/027001.
- [86] HAN Z L, WANG P, MAO G Y, et al. Dual pH-responsive hydrogel actuator for lipophilic drug delivery[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(10): 12010-12017.
- [87] FIRESTONE B A, SIEGEL R A. Kinetics and mechanisms of water sorption in hydrophobic, ionizable copolymer gels[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1991, 43(5): 901-914.
- [88] SCHILLI C M, ZHANG M, RIZZARDO E, et al. A new double-responsive block copolymer synthesized via RAFT polymerization: Poly(*N*-isopropylacrylamide)-block-poly(acrylic acid)[J]. *Macromolecules*, 2004, 37(21): 7861-7866.
- [89] TORRES-LUGO M, PEPPAS N A. Molecular design and in vitro studies of novel pH-sensitive hydrogels for the oral delivery of calcitonin[J]. *Macromolecules*, 1999, 32(20): 6646-6651.
- [90] LI G, ZHANG G P, SUN R, et al. Dually pH-responsive polyelectrolyte complex hydrogel composed of polyacrylic acid and poly(2-(dimethylamino)ethyl methacrylate)[J]. *Polymer*, 2016, 107: 332-340.
- [91] SHIN J, HAN S G, LEE W. Inverse opal pH sensors with various protic monomers copolymerized with polyhydroxyethylmethacrylate hydrogel[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 752: 87-93.
- [92] WU W, MITRA N, YAN E C Y, et al. Multifunctional hybrid nanogel for integration of optical glucose sensing and self-regulated insulin release at physiological pH[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(8): 4831-4839.
- [93] MUKHOPADHYAY P, SARKAR K, BHATTACHARYA S, et al. pH sensitive *N*-succinyl chitosan grafted polyacrylamide hydrogel for oral insulin delivery[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 112: 627-637.
- [94] ZHANG N Y, LIU M Z, SHEN Y G, et al. Preparation, properties, and drug release of thermo- and pH-sensitive poly((2-dimethylamino)ethyl methacrylate)/poly(*N,N*-diethylacrylamide) semi-IPN hydrogels[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(5): 1523-1534.
- [95] LI X, CAI X B, GAO Y F, et al. Reversible bidirectional bending of hydrogel-based bilayer actuators[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2017, 5(15): 2804-2812.
- [96] DING M, JING L, YANG H, et al. Multifunctional soft machines based on stimuli-responsive hydrogels: From freestanding hydrogels to smart integrated systems[J]. *Materials Today Advances*, 2020, 8. DOI: 10.1016/j.mtadv.2020.100088.

- [97] ABOU TALEB M F. Radiation synthesis of multifunctional polymeric hydrogels for oral delivery of insulin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 62: 341-347.
- [98] HUYNH V, JESMER A H, SHOAIB M M, et al. Influence of hydrophobic cross-linkers on carboxybetaine copolymer stimuli response and hydrogel biological properties[J]. *Langmuir*, 2019, 35(5): 1631-1641.
- [99] YU X R, LIU J S, XIN Y, et al. Temperature and salt responsive zwitterionic polysulfamide-based nanogels with surface regeneration ability and controlled drug release[J]. *Polymer Chemistry*, 2019, 10(47): 6423-6431.
- [100] GEORGIEV G S, KAMENSKA E B, VASSILEVA E D, et al. Self-assembly, antipolyelectrolyte effect, and nonbiofouling properties of polyzwitterions[J]. *Biomacromolecules*, 2006, 7(4): 1329-1334.
- [101] BLACKMAN L D, GUNATILLAKE P A, CASS P, et al. An introduction to zwitterionic polymer behavior and applications in solution and at surfaces[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(3): 757-770.
- [102] ZHANG Z, CHEN S F, JIANG S Y. Dual-functional biomimetic materials: Nonfouling poly(carboxybetaine) with active functional groups for protein immobilization[J]. *Biomacromolecules*, 2006, 7(12): 3311-3315.
- [103] HU Y C, YANG G, LIANG B, et al. The fabrication of super-low protein absorption zwitterionic coating by electrochemically mediated atom transfer radical polymerization and its application[J]. *Acta Biomaterialia*, 2015, 13: 142-149.
- [104] SONG L J, ZHAO J, LUAN S F, et al. Fabrication of a detection platform with boronic-acid-containing zwitterionic polymer brush[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(24): 13207-13215.
- [105] FONTES C M, ACHAR R K, JOH D Y, et al. Engineering the surface properties of a zwitterionic polymer brush to enable the simple fabrication of inkjet-printed point-of-care immunoassays[J]. *Langmuir*, 2019, 35(5): 1379-1390.
- [106] XIAO S W, ZHANG Y X, SHEN M X, et al. Structural dependence of salt-responsive polyzwitterionic brushes with an anti-polyelectrolyte effect[J]. *Langmuir*, 2018, 34(1): 97-105.
- [107] XIAO S W, YANG Y, ZHONG M Q, et al. Salt-responsive bilayer hydrogels with pseudo-double-network structure actuated by polyelectrolyte and antipolyelectrolyte effects[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(24): 20843-20851.
- [108] PARAMONOV S V, LOKSHIN V, FEDOROVA O A. Spiropyran, chromene or spirooxazine ligands: Insights into mutual relations between complexing and photochromic properties[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2011, 12(3): 209-236.
- [109] YAMAGUCHI H, KOBAYASHI Y, KOBAYASHI R, et al. Photoswitchable gel assembly based on molecular recognition[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1). DOI: 10.1038/ncomms1617.
- [110] YANG L, TANG H L, SUN H. Progress in photo-responsive polypeptide derived nano-assemblies[J]. *Micromachines*, 2018, 9(6). DOI: 10.3390/mi9060296.
- [111] ZAKREVSKYY Y, RICHTER M, ZAKREVSKA S, et al. Light-controlled reversible manipulation of microgel particle size using azobenzene-containing surfactant[J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(23): 5000-5009.
- [112] TAKASHIMA Y, HATANAKA S, OTSUBO M, et al. Expansion-contraction of photoresponsive artificial muscle regulated by host-guest interactions[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1). DOI: 10.1038/ncomms2280.
- [113] SATOH T, SUMARU K, TAKAGI T, et al. Fast-reversible light-driven hydrogels consisting of spirobenzopyran-functionalized poly(*N*-isopropylacrylamide)[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(18): 8030-8034.
- [114] LI C, XUE Y G, HAN M D, et al. Synergistic photoactuation of bilayered spiropyran hydrogels for predictable origami-like shape change[J]. *Matter*, 2021, 4(4): 1377-1390.
- [115] ZHU Q L, DU C, DAI Y, et al. Light-steered locomotion of muscle-like hydrogel by self-coordinated shape change and friction modulation[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1). DOI: 10.1038/s41467-020-18801-1.
- [116] SUN Z F, YAMAUCHI Y, ARAOKA F, et al. An anisotropic hydrogel actuator enabling earthworm-like directed peristaltic crawling[J]. *Angewandte Chemie*, 2018, 130(48): 15998-16002.
- [117] ZHAO Q, LIANG Y H, REN L, et al. Bionic intelligent hydrogel actuators with multimodal deformation and locomotion[J]. *Nano Energy*, 2018, 51: 621-631.
- [118] CAO Y, LI W J, QUAN F Y, et al. Green-light-driven poly(*N*-isopropylacrylamide-acrylamide)/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite hydrogel actuators[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.827608.
- [119] GARNICA-PALAFIX I M, ESTRELLA-MONROY H O, VÁZQUEZ-TORRES N A, et al. Influence of multi-walled carbon nanotubes on the physico-chemical and biological responses of chitosan-based hybrid hydrogels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 236. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.115971.
- [120] ZHAO Y S, XUAN C, QIAN X S, et al. Soft phototactic swimmer based on self-sustained hydrogel oscillator[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(33). DOI: 10.1126/scirobotics.aax7112.
- [121] CHEN L, WEI X S, SUN Y, et al. A bamboo/PNIPAM composite hydrogel assembly for both programmable and remotely-controlled light-responsive biomimetic actuations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446(3). DOI: 10.1016/j.cej.2022.137072.
- [122] KOETTING M C, PETERS J T, STEICHEN S D, et al. Stimulus-responsive hydrogels: Theory, modern advances, and applications[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2015, 93: 1-49.
- [123] BAE Y H, OKANO T, KIM S W. Temperature dependence of swelling of crosslinked poly(*N,N'*-alkyl substituted acrylamides) in water[J]. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 1990, 28(6): 923-936.
- [124] KATONO H, MARUYAMA A, SANUI K, et al. Thermo-responsive swelling and drug release switching of interpenetrating polymer networks composed of poly(acrylamide-co-butyl methacrylate) and poly(acrylic acid)[J]. *Journal of Controlled Release*, 1991, 16(1-2): 215-227.
- [125] OWENS D E, JIAN Y, FANG J E, et al. Thermally responsive swelling properties of polyacrylamide/poly(acrylic acid) interpenetrating polymer network nanoparticles[J]. *Macromolecules*, 2007, 40(20): 7306-7310.
- [126] CHENG Y, REN K, YANG D, et al. Bilayer-type fluorescence hydrogels with intelligent response serve as temperature/pH driven soft actuators[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 255(3): 3117-3126.

- [127] LIU J, JIANG L, LIU A, et al. Ultrafast thermo-responsive bilayer hydrogel actuator assisted by hydrogel microspheres[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 357. DOI: 10.1016/j.snb.2022.131434.
- [128] ASOH T, MATSUSAKI M, KANEKO T, et al. Fabrication of temperature-responsive bending hydrogels with a nanostructured gradient[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(11): 2080-2083.
- [129] YAO C, LIU Z, YANG C, et al. Poly(*N*-isopropylacrylamide)-clay nanocomposite hydrogels with responsive bending property as temperature-controlled manipulators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(20): 2980-2991.
- [130] FAN W X, YIN J C, YI C L, et al. Nature-inspired sequential shape transformation of energy-patterned hydrogel sheets [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, 12(4): 4878-4886.
- [131] HOARE T, SANTAMARIA J, GOYA G F, et al. A magnetically triggered composite membrane for on-demand drug delivery [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(10): 3651-3657.
- [132] KIM Y S, LIU M, ISHIDA Y, et al. Thermoresponsive actuation enabled by permittivity switching in an electrostatically anisotropic hydrogel[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(10): 1002-1007.

#### 作者简介:

吴佳祥 (1998-), 男, 硕士生。研究领域: 固体力学, 软物质力学。

李铁风 (1986-), 男, 教授, 博士生导师。研究领域: 软物质力学, 智能系统, 软体仿生机器人, 医用智能材料与器件, 深海装备, 空天装备。