

文章编号: 1007-2780(2025)02-0201-17

液晶弹性体在人工肌肉领域的研究进展

陈雯慧, 周晓航, 刘珂*
(北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 液晶弹性体是一种由液晶基元构成的高分子材料, 具有优异的弹性以及来源于液晶取向转变的可逆变形能力。这种特殊的可逆变形能力与自然肌肉的变形特征十分相似, 使得液晶弹性体成为制备人工肌肉的理想材料之一, 近年来得到广泛研究。本综述介绍了基于液晶弹性体的人工肌肉的制备方式、驱动方式及应用表现。考虑到液晶弹性体人工肌肉与自然肌肉之间存在的差异, 本综述着重对比了两者的驱动性能, 详细介绍了针对液晶弹性体人工肌肉的驱动性能的改进方法, 包括化学改性与结构优化。除此之外, 本文也对近年来液晶弹性体人工肌肉在软体机器人及医疗设备领域的发展进行了论述与展望。

关键词: 液晶弹性体; 人工肌肉; 驱动性能; 软体机器人; 医疗器械

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2024-0228 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2024-0228

Application of liquid crystal elastomers in the development of artificial muscles

CHEN Wenhui, ZHOU Xiaohang, LIU Ke*

(College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Liquid crystal elastomers (LCEs) are high-performance polymer materials composed of liquid crystal units that exhibit excellent elasticity and reversible deformation through liquid crystal orientation transitions. This reversible deformation closely mimics the behavior of natural muscles, making LCEs an ideal material for artificial muscle fabrication. In recent years, extensive research has focused on LCE-based artificial muscles. This review provides an overview of the preparation methods and actuation modes of LCE-based artificial muscles. It emphasizes a comparative analysis of the actuation performance of LCE-based artificial muscles versus natural muscles and methods for enhancing the actuation performance of LCE-based artificial muscles through chemical modification and structural optimization. Additionally, this review discusses the future prospects for the development of LCE-based artificial muscles in soft robotics and intelligent medical devices.

Key words: liquid crystal elastomer; artificial muscle; actuation performance; soft robot; medical devices

收稿日期: 2024-08-11; 修订日期: 2024-08-27.

基金项目: 国家重点研发计划(No.2022YFB4701900); 国家自然科学基金(No.12372159)

Supported by National Key R & D Program of China (No.2022YFB4701900); National Natural Science Foundation of China (No.12372159)

*通信联系人, E-mail: liuke@pku.edu.cn

1 引言

肌肉是动物实现卓越机动性、敏捷性和适应性的关键驱动器^[1-2],为设计与制备可作为柔性驱动器的人工肌肉提供了重要的灵感。人工肌肉可以广泛应用于柔性和仿生机器的制造,使驱动设备更加灵活、适应性更强,并能够更好地与环境交互^[3-6]。而人工肌肉的驱动表现高度依赖于其组成材料的选择。为了使人工肌肉的性能和形态更接近自然肌肉,无需复杂控制单元的智能材料逐渐成为主流选择^[7-9]。

在众多用于制备人工肌肉的智能材料中,液晶弹性体尤为突出。当受到某些物理或化学刺激时,其液晶分子的取向能够在有序状态和无序状态之间切换,从而产生可逆的大变形,展现出与自然肌肉相似的特性^[10-14]。这种特性使基于液晶弹性体的人工肌肉系统具备更灵活的任务适应性,从而在智能机器人和医疗设备领域获得了初步应用^[15-17]。然而,基于智能材料的人工肌肉长期以来无法超越自然肌肉的驱动性能,使其应用范围受限,液晶弹性体人工肌肉也不例外。因此,越来越多的研究着眼于提升液晶弹性体人工肌肉的驱动性能^[18-23]。如今,液晶弹性体人工肌肉的驱动性能已从落后于自然肌肉,发展到与之相当,甚至到超越了自然肌肉的水平,大幅提升了智能材料人工肌肉系统在实际生产生活领域的应用潜力。

本文综述了液晶弹性体在人工肌肉领域的研究进展,包括液晶弹性体人工肌肉的制备方法、驱动方式、与自然肌肉的性能对比以及驱动性能的改进方法,并讨论了其在智能机器人与医疗设备领域的应用和发展前景。

2 液晶弹性体人工肌肉的制备方法

液晶弹性体人工肌肉的形态可以根据应用场景的具体需求进行定制和塑造,以适应不同的功能要求^[18-19],其形态主要包括块状、薄膜状、纤维状。不同形状的液晶弹性体人工肌肉所适用的制备方法略有差异。通过一步交联法,将液晶单体或液晶聚合物前驱体与交联

剂混合形成交联网络结构聚合物,这种聚合物通常可以通过3D打印的方式制备为任何形状^[20-21]。除此之外,也可以使用两步交联法,使液晶单体或液晶聚合物前驱体与交联剂混合形成部分交联网络,形成具有流动性和可塑性的中间体,用干法纺丝^[24-25]或湿法纺丝^[26-28]等方法将液晶弹性体挤出为纤维状,辅以机械力或外部场(如电场或磁场)进行取向,进而完成最后的交联形成液晶弹性体纤维。此外,这种中间体也可以再通过模板浇筑,在不同形状的模具取出后拉伸并在进一步的交联后形成完全交联的网络^[29-32]或者在3D打印^[22-23]成特定形状后进行进一步交联,从而制得不同形状的液晶弹性体。不同制备方法的原理图总结于图1。

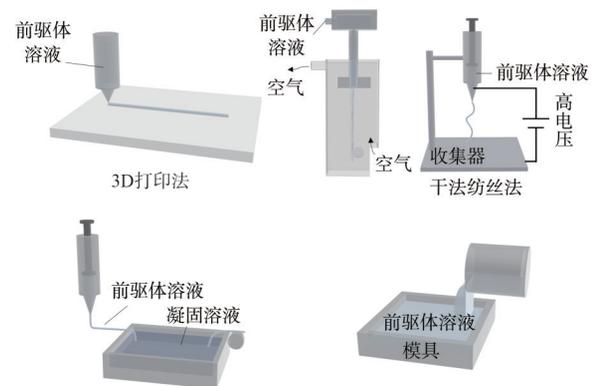


图1 液晶弹性体人工肌肉的制备方法:3D打印法、干法纺丝法、湿法纺丝法、模板法。

Fig. 1 Fabrication methods of liquid crystal elastomer: 3D printing, dry spinning, wet spinning, template method.

2.1 3D 打印

3D打印,又称增材制造,是目前最流行的先进制造技术之一。使用3D打印制备液晶弹性体人工肌肉无需人工分丝处理,整个制备过程可以完全由机器自动完成。根据原理不同,适用于液晶弹性体人工肌肉的3D打印方式主要有墨水直写法(Direct Ink Writing, DIW)^[22-23]和光固化法(Digital Light Processing, DLP)^[20-21]。前者是通过气流将液晶弹性体前驱体从注射器挤出,并在取向完成后使用紫外光照射一定时间固定取向从而完成制备;后者是通过已经诱导取向

的液晶弹性体前驱体溶液进行不同图案的紫外线处理。在这两种3D打印方式中,前者的制备精度取决于喷嘴的尺寸,而后的精度则受紫外光斑尺寸的影响。一般来说,喷嘴的尺寸通常在150 μm 以上,而紫外光斑的尺寸可以控制在几十微米以内。因此,DLP的制备精度通常优于DIW方法。然而,DLP设备的价格较高,这使得通过这种方式制备的液晶弹性体人工肌肉成本也较高。

2.2 干法/湿法纺丝

干法纺丝和湿法纺丝是两种广泛应用于纺织工业的技术,同样也适用于液晶弹性体人工肌肉的制备。干法纺丝主要通过机械、气流或电场拉伸液晶弹性体前驱体溶液,然后在紫外光的照射下完成最后的固化^[24-25]。在液晶弹性体人工肌肉的制备中,最常用的干法纺丝工艺是静电纺丝^[24]以及电射流纺丝^[25]。静电纺丝^[24]利用高电压产生的电场,将前驱体溶液拉伸成超细纤维。该方法能生产具有纳米级直径的纤维,具有高比表面积和良好的机械性能。电射流纺丝^[25]则通过将前驱体溶液注入一个高压电场中,产生高速液体射流,形成连续的纤维。

湿法纺丝则是将液晶弹性体前驱体溶液混合在适当的溶剂中,通过纺丝机器注入,利用旋转的喷丝孔或旋转盘等设备将溶液喷射在空气中。待溶剂挥发后,再使用紫外光进行固化^[26-28]。干法和湿法纺丝技术能够制造出极细的液晶弹性体人工肌肉纤维,其制备尺寸可达数微米,是目前精度最高的液晶弹性体人工肌肉制备方式之一。然而,这两种制备方式需要昂贵的设备和高昂的金钱成本。此外,通过这些纺丝工艺制备的液晶弹性体人工肌肉纤维通常需要后续的分丝处理,这一步骤通常由人工完成,工艺复杂且耗时。

2.3 模板法

模板法是最为常用的一种材料制备方法^[29-32]。在模板法中,液晶弹性体的前驱体溶液被倒入预先设计好形状的模具中,经部分交联后取出脱模,然后通过机械拉伸来设定其取向,经过进一步的交联处理,液晶弹性体达到完全固化。模板法操作简单且精度较高,是液晶弹性体人

工肌肉最常用的制备方式之一^[33-34]。通过模板法制备的液晶弹性体人工肌肉具有很高的可塑性,能够被塑造成各种所需的形状,以适应不同的应用环境。这种方法的另一个优势是它能够在制造过程中实现高度的结构和形态控制,从而确保材料在实际应用中的性能一致性和可靠性。然而,模板的制备需要一定的时间和金钱成本,在一定程度上增加了生产的复杂性和成本。此外,对于一些复杂或细微的结构,模板的设计和制造可能需要更高的精度和技术支持。

在这些制备方式中,模板法和3D打印方法适用于液晶弹性体人工肌肉的各种形态,成本相对较低,精度较高,制备难度也较低,因此应用广泛。而干法和湿法纺丝只适用于制备纤维状的液晶弹性体人工肌肉,其制备难度和成本较高,因此使用范围较为有限。

3 液晶弹性体人工肌肉的驱动方式

根据不同的驱动原理、驱动源和应用需求,目前针对液晶弹性体人工肌肉发展出了几种主要的驱动方式,包括近程热驱动、电驱动、磁驱动、光驱动以及湿度驱动。

3.1 近程热驱动

热驱动是液晶弹性体人工肌肉中最常用的驱动方式之一,其机理如图2所示。有取向的液晶弹性体,在温度超过向列相转变温度时,内部的液晶介晶会发生相变,导致原本的取向消失,从而使液晶弹性体沿原取向方向收缩。当温度重新降低到转变温度以下时,液晶介晶会恢复到之前的取向状态,使液晶弹性体恢复到之前的长度(图2(a))^[35]。近程热驱动通常以热水加热、热风加热或热板加热等方式实现,这些方法对接触要求较高。Sun等^[36]用干法纺丝液制备液晶弹性体纤维,再将液晶弹性体纤维编织成为人工肌肉,在热风的作用下实现了35%的驱动应变(图2(b~g))。Lugger等^[37]利用模板法制备的螺旋人工肌肉在热板的加热驱动下实现了30%的驱动应变(图2(h~j))。这些热驱动的实现方式受使用场景限制较多,会使液晶弹性体人工肌肉在实际应用中面临一定的挑战。

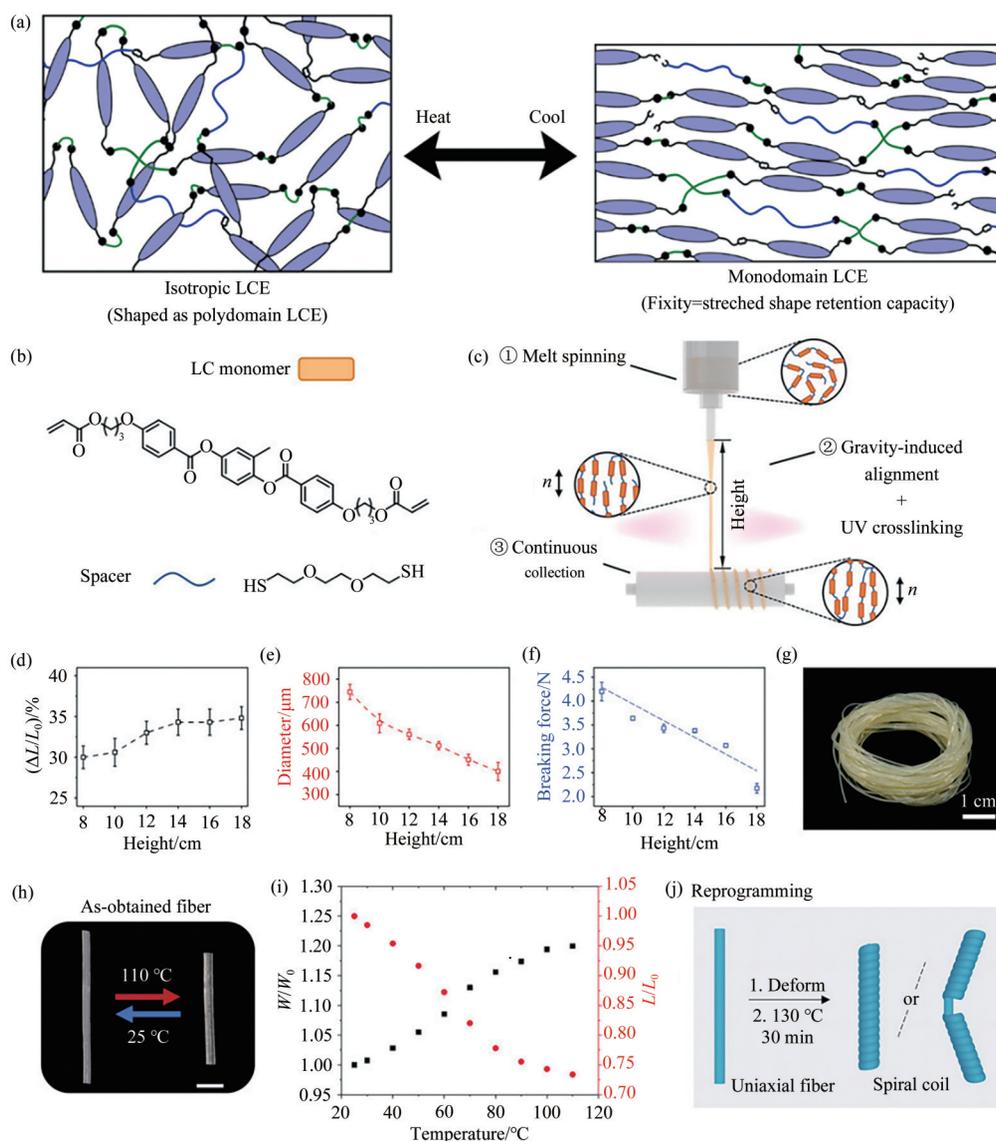


图 2 (a) 液晶弹性体在热驱动下变形的机理^[35]; (b~g) 通过干法纺丝制备的液晶弹性体人工肌肉过程与其在热驱动下的表现^[36]; (h~j) 通过模板法制备的液晶弹性体人工肌肉过程与其在热驱动下的表现^[37]。

Fig. 2 (a) Mechanism of the deformation of liquid crystal elastomer actuated by heat^[35]; (b~g) Liquid crystal elastomer artificial muscle preparation by dry spinning and its performance under thermal actuation^[36]; (h~j) Liquid crystal elastomer artificial muscle process prepared by template method and its performance under thermal actuation^[37].

3.2 电驱动

虽然近程的热驱动可以有效地使液晶弹性体人工肌肉产生大变形,但由于难以实现远程控制,并且需要保证液晶弹性体人工肌肉与热源的有效接触,这些情况限制了液晶弹性体人工肌肉的应用场景。因此,作为一种可远程控制的替代方式,利用焦耳热的电驱动方式近年来成为流行的选择^[38-43]。电驱动方式主要通过将液晶弹性体上植入、包裹或混合电热材料等方法实现。施加电流时产生的热输入可以刺激液晶弹性体人工

肌肉产生变形。植入型的电热材料包括柔性导电材料^[38-40]和刚性导电材料^[41-42],前者主要是液态金属^[38-39],后者主要是金属导电丝(铜丝等)^[40,43]。柔性的液态金属与刚性导电材料不同,在导电产热的同时不会对液晶弹性体人工肌肉的变形产生限制。例如,在 40 W/cm^2 的电信号刺激下,复合了液态金属的液晶弹性体人工肌肉能够产生 50% 的长度收缩,并且还具有一定的电阻传感表现^[38](图 3(a~f))。

包裹或混合在液晶弹性体人工肌肉上的电

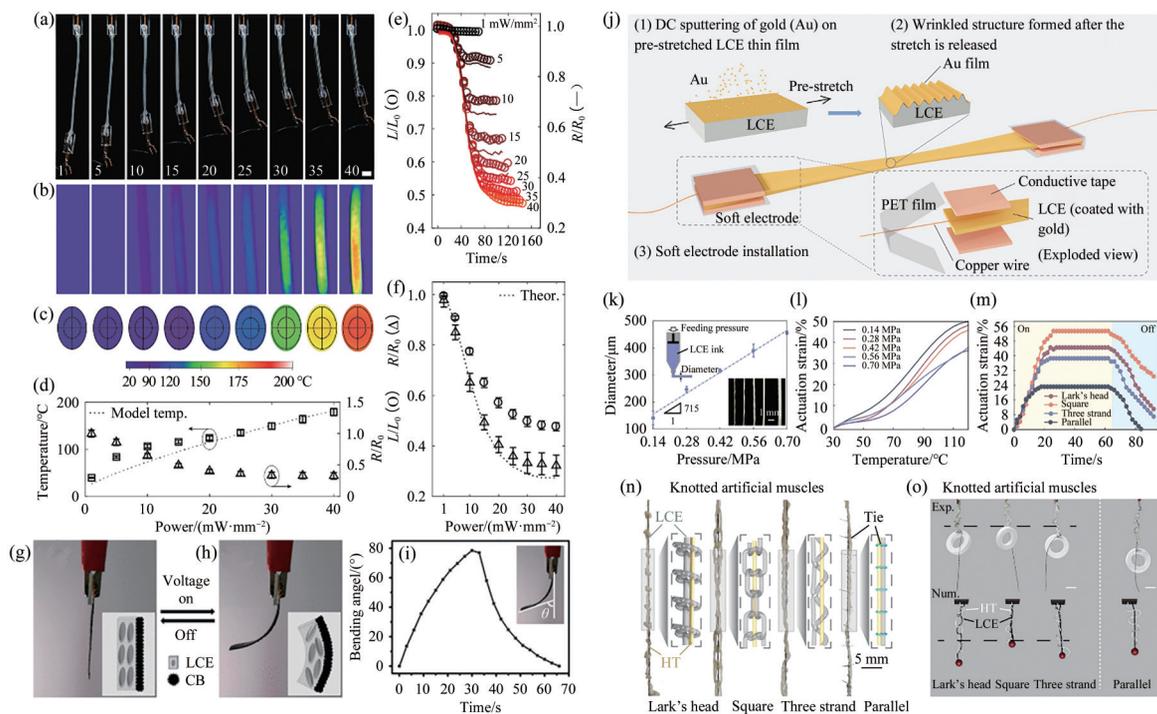


图3 (a~f) 含有液态金属夹层的液晶弹性体人工肌肉在电驱动下的表现^[38]; (g~i) 含有炭黑夹层的液晶弹性体人工肌肉在电驱动下的表现^[44]; (j) 含有纳米金涂层的液晶弹性体人工肌肉的制备过程^[46]; (k~o) 与柔性导线编织一起制备成的液晶弹性体绳结人工肌肉在电驱动下的表现^[47]。

Fig. 3 (a~f) Performance of liquid crystal elastomer artificial muscles containing liquid metal interlayers under electrical actuation^[38]; (g~i) Performance of liquid crystal elastomer artificial muscles containing carbon black interlayers under electrical actuation^[44]; (j) Preparation process of liquid crystal elastomer artificial muscles containing gold nanocoating^[46]; (k~o) Performance of liquid crystal elastomer knotted artificial muscles prepared together with flexible wire braiding under electrical actuation^[47].

热材料主要包括炭黑^[44]、液态金属^[45]、纳米金属^[46]、柔性导线^[47]等。外层包裹的炭黑、液态金属和纳米金属涂层无法随着液晶弹性体的变形而自由变形,因此这样的液晶弹性体变形时会在外层产生褶皱现象(图3(g~j))。在这种情况下,涂层越薄,涂层的存在对液晶弹性体人工肌肉的变形影响越小。柔性导线包裹在液晶弹性体人工肌肉表面的方式有两种形式:一种是缠绕包裹,另一种是编织组合。这两种形式可以通过避开阻碍液晶弹性体收缩的方向来减少对其变形的干扰。例如,将不锈钢混合柔性纤维与液晶弹性体纤维编织在一起制备的人工肌肉在0.8 A电流驱动下能够产生53%的高应变^[47](图3(k~o))。

3.3 磁驱动

与电驱动一样,磁驱动也是一种远程驱动方式^[48-52]。磁驱动的实现主要有两种机理,包括磁

场定向驱动与磁场热驱动。磁场定向驱动是在液晶弹性体前驱体溶液中预先加入磁性材料,使制备的液晶弹性体人工肌肉在外加磁场的作用下产生定向的变形^[48-49](图4(a~c))。这种方式里添加的磁性材料主要包括受磁场吸引的二氧化三铁或三氧化四铁颗粒,这些材料作为刚性的第二相,在外加磁场的引导下,引导柔性的液晶弹性体人工肌肉产生朝向相应磁场方向的定向变形。磁场热驱动是在液晶弹性体前驱体溶液中预先加入能在磁场作用下产生热量的磁性材料,如钕铁硼(NdFeB)颗粒。通过外加磁场产生的热量使液晶弹性体的温度升高到向列转变温度以上,从而引发收缩行为^[50-52]。这种方式允许通过调节磁场强度来控制热量的产生量,进而控制液晶弹性体人工肌肉的变形程度。Wu等人^[50]通过这种磁场热驱动的原理成功实现了利用磁化后的液晶弹性体人工肌肉驱动机器人手臂的

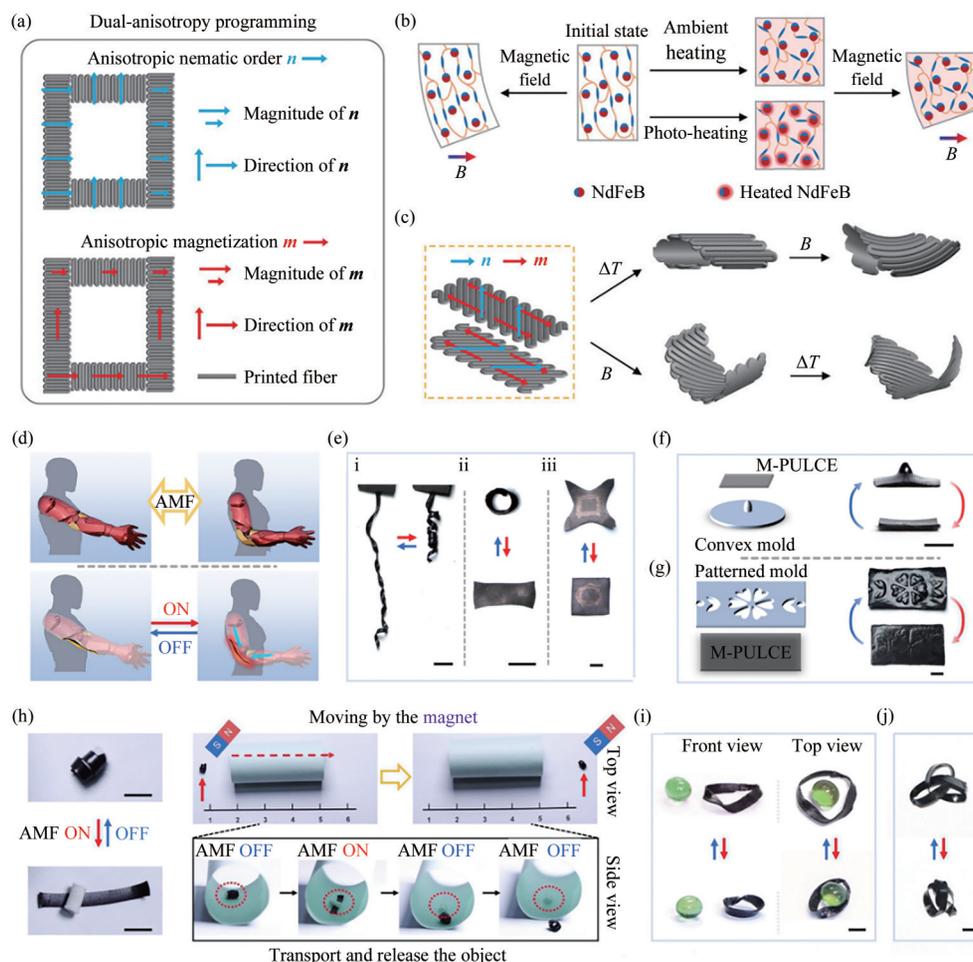


图 4 (a~c) 嵌入的钕铁硼微粒的液晶弹性体人工肌肉在磁场下的驱动机理及驱动表现^[48]; (d~f) 封闭式机械臂中含磁颗粒液晶弹性体人工肌肉(M-PULCE)的无线磁驱动; 执行器在磁场驱动下执行收缩运动, 驱动机械臂弯曲。(e~j) M-PULCE 的各种驱动运动模式。比例尺: 5 mm^[50]。

Fig. 4 (a~c) Driving mechanism and driving performance of liquid crystal elastomer artificial muscles embedded with NdFeB particles under magnetic fields^[48]. (d~f) Wireless magnetic actuation of magnetic particle liquid crystal elastomer artificial muscle (M-PULCE) in a closed robotic arm. The actuator performs contraction movement driven by the magnetic field, driving the mechanical arm to bend. (e~j) Various actuation motion modes of M-PULCEs under AMF. Scale bar: 5 mm^[50].

弯曲和收缩(图4(d~j))。然而,这两种磁驱动方式都依赖于磁场的存在,因此在一些极端环境或难以搭建磁场的应用场景下可能存在使用限制。

3.4 光驱动

光驱动也是液晶弹性体人工肌肉的一种主流驱动方式^[53-59]。光驱动的原理包括直接光驱动与光热效应驱动。直接光驱动指通过光照使液晶分子的取向发生转变,从而驱动液晶弹性体发生形变^[55-57]。这种方法通常在液晶弹性体的配方中加入偶氮苯衍生物,利用光异构化来

实现光驱动。使用这种配方制备的液晶弹性体人工肌肉可以通过光引发机械变形,使基于液晶弹性体人工肌肉的跳跃机器人实现10个体长(BL)的最大跳跃高度,以及62 BL/s的起飞速度(图5(a,b))^[57]。

光热效应驱动是指通过光热效应使液晶弹性体的温度提升到其向列转变温度以上,从而使液晶分子的取向发生转变,导致液晶弹性体收缩^[53-54]。这种方法通常需要增加光热涂层,液晶弹性体的化学配方只需与基于热驱动机制的配方一致。常见的光热涂层包括炭黑、石墨烯、碳

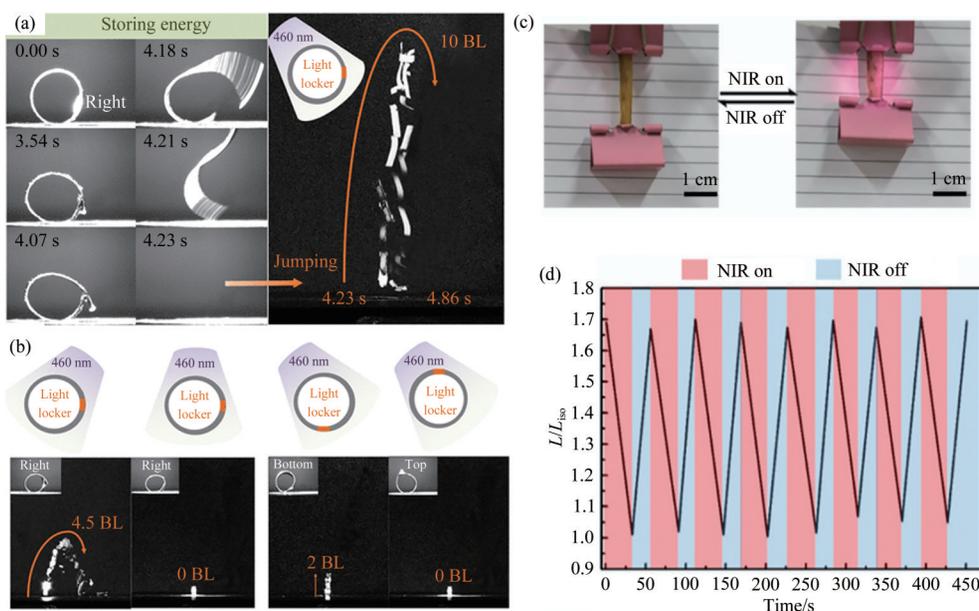


图 5 (a,b) DR1-LCE 跳动执行器,采用闭环结构,可通过光机械耦合实现^[57]; (c,d) 由近红外光驱动的 GNR/LCE 复合薄膜示意图^[54]。

Fig. 5 (a, b) DR1-LCE jumping actuator with a closed-loop structure enabled by photo-mechanical coupling^[57]; (c, d) Schematic diagram of GNR/LCE composite film driven by near-infrared light^[54].

纳米管、金纳米颗粒和聚多巴胺等。这些涂层能够吸收近红外光并将其转化为大量的热量,使液晶弹性体人工肌肉的温度提升至其向列转变温度以上。基于这种原理,可以使用近红外光将复合了金纳米颗粒的液晶弹性体表面温度提升至 120 °C 以上,从而驱动液晶弹性体人工肌肉产生变形(图 5(c,d))^[54]。

3.5 湿度驱动

湿度驱动的机理不同于前述所有驱动方式,

不涉及液晶介晶取向的转变。其驱动原理是通过构造液晶弹性体表面亲水性的差异,使其在高湿度环境下,由于吸水量不同产生膨胀程度差异,从而引起弯曲变形^[60-61]。Kim 等^[61]通过在液晶弹性体一侧表面引入阳离子,构造了不对称的亲水性,从而使液晶弹性体人工肌肉在干/湿环境切换中产生可逆的弯曲变形(图 6)。由于湿度驱动的应用场景非常有限,其研究相对较少。

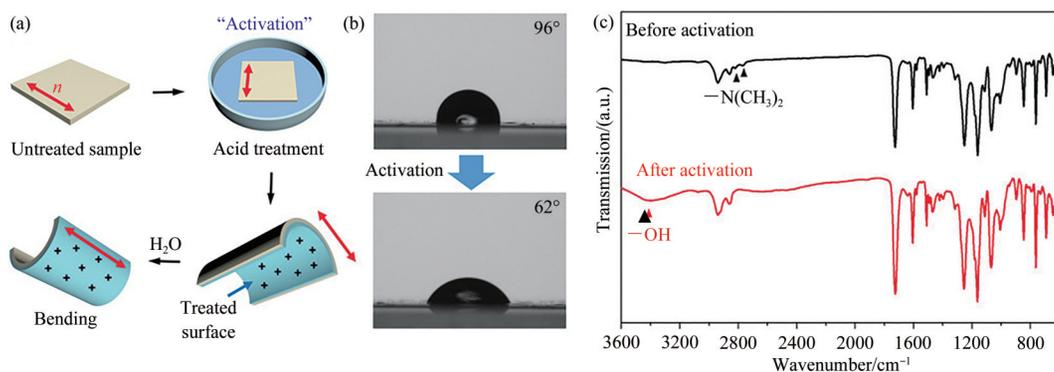


图 6 (a) 酸性溶液活化单结构域 h-LCE 及其暴露于水分时的弯曲行为示意图; (b) 激活前后 h-LCE 的接触角; (c) 激活前后 h-LCE 的 FTIR 光谱^[61]。

Fig. 6 (a) Schematic of monodomain h-LCE activation by acidic solution and its bending behavior upon exposure to moisture; (b) Contact angles of an h-LCE before and after activation; (c) FTIR spectra of an h-LCE before and after activation^[61].

4 液晶弹性体人工肌肉的驱动性能及改进方法

液晶弹性体人工肌肉能否在实际应用中发挥作用,取决于其驱动性能。目前具有代表性的液晶弹性体人工肌肉的驱动性能(驱动应变、驱动频率、功率密度)与动物肌肉的性能对比总结于图7。根据图7所示,在2000年,液晶弹性体人工肌肉的驱动性能里只有驱动应变超过自然肌肉,其余驱动性能均远低于自然肌肉。随着研究人员对液晶弹性体人工肌肉的深入研究,液晶弹性体人工肌肉的驱动性能已经能够全面达到或者超过自然肌肉的水平^[25,62-64],这都是归功于在研究过程中使用了一些化学改性^[63-64]和结构优化^[25,62]的方法。

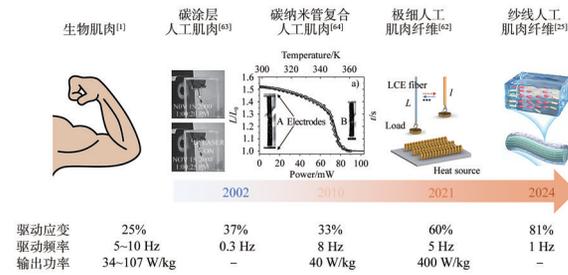


图7 自然肌肉与液晶弹性体人工肌肉驱动性能的比较^[1,25,62-64]

Fig. 7 Comparison of the actuation performance of natural muscles and liquid crystal elastomer artificial muscles^[1,25,62-64]

4.1 化学改性

化学改性的方法是指通过改变液晶弹性体的配方^[65-66],或者增加第二相的方式提升液晶弹性体人工肌肉的驱动性能^[62,67-68]。近年来,化学改性的方法被大范围研究。例如,通过改变配方,Saed等^[66]通过增加含有2~11个碳的二硫醇烷基间隔层的长度(C2~C11),将中间相调制为向列相(图8(a)),成功地将向列相的各向同性转变温度调整至90~140 °C之间,并将平均输出功率从128 kJ/m³提高到262 kJ/m³,超过了自然肌肉激活时的水平。另一方面,增加第二相的方式通常以在液晶弹性体前驱体溶液里增加第二相颗粒^[60]或在液晶弹性体人工肌肉表面增加第二相

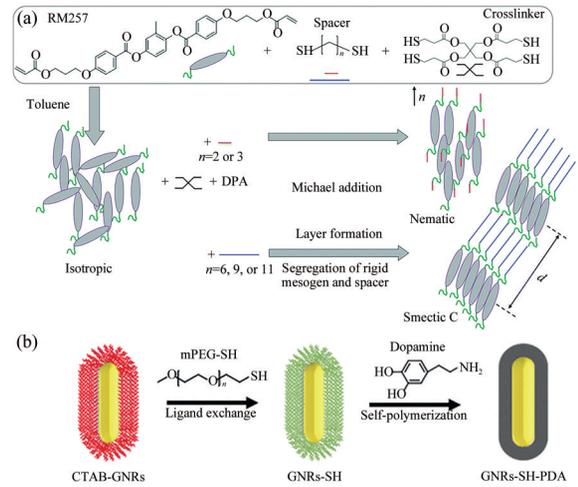


图8 (a) 通过硫醇-丙烯酸酯迈克尔加成反应合成主链LCE示意图。在合成过程中,分子在60 °C的溶剂(甲苯)中处于各向同性相^[66]。(b) 在LCE表面增加聚多巴胺涂层程序示意图^[68]。

Fig. 8 (a) Schematic of main-chain LCE synthesis *via* thiol-acrylate Michael addition reaction. During synthesis, mesogens are in the isotropic phase in a present of solvent (toluene) at 60 °C^[66]. (b) Schematic illustration of the preparation of dopamine layer on liquid crystal elastomer^[68].

涂层的方式实现^[67-68]。Zhang等^[66]在液晶弹性体表面施加聚多巴胺涂层(图8(b)),使液晶弹性体人工肌肉薄膜能在2 s内实现弯曲,这样的改善使液晶弹性体人工肌肉的驱动速度接近了自然肌肉的水平。这些研究均表明,化学改性的手段在液晶弹性体人工肌肉驱动性能的优化上发挥了十分积极的作用。

4.2 结构改性

与化学改性相比,结构优化的关注度相对较低,因此在这一领域的探索相对有限。而与较低的关注度不同的是,结构优化对于液晶弹性体人工肌肉的驱动性能优化效果非常显著。例如,将液晶弹性体纤维的直径降低到数微米以内,提升其比表面积,能使液晶弹性体人工肌肉的驱动应变和驱动速度都达到甚至超过自然肌肉的水平^[62,67,69]。不过,当这些人工肌肉纤维被合并到实际应用尺寸后,由于比表面积的下落,其驱动性能也随之下降(图9(a~c))^[62]。Chen等^[47]将液晶弹性体纤维束编织成绳结的结

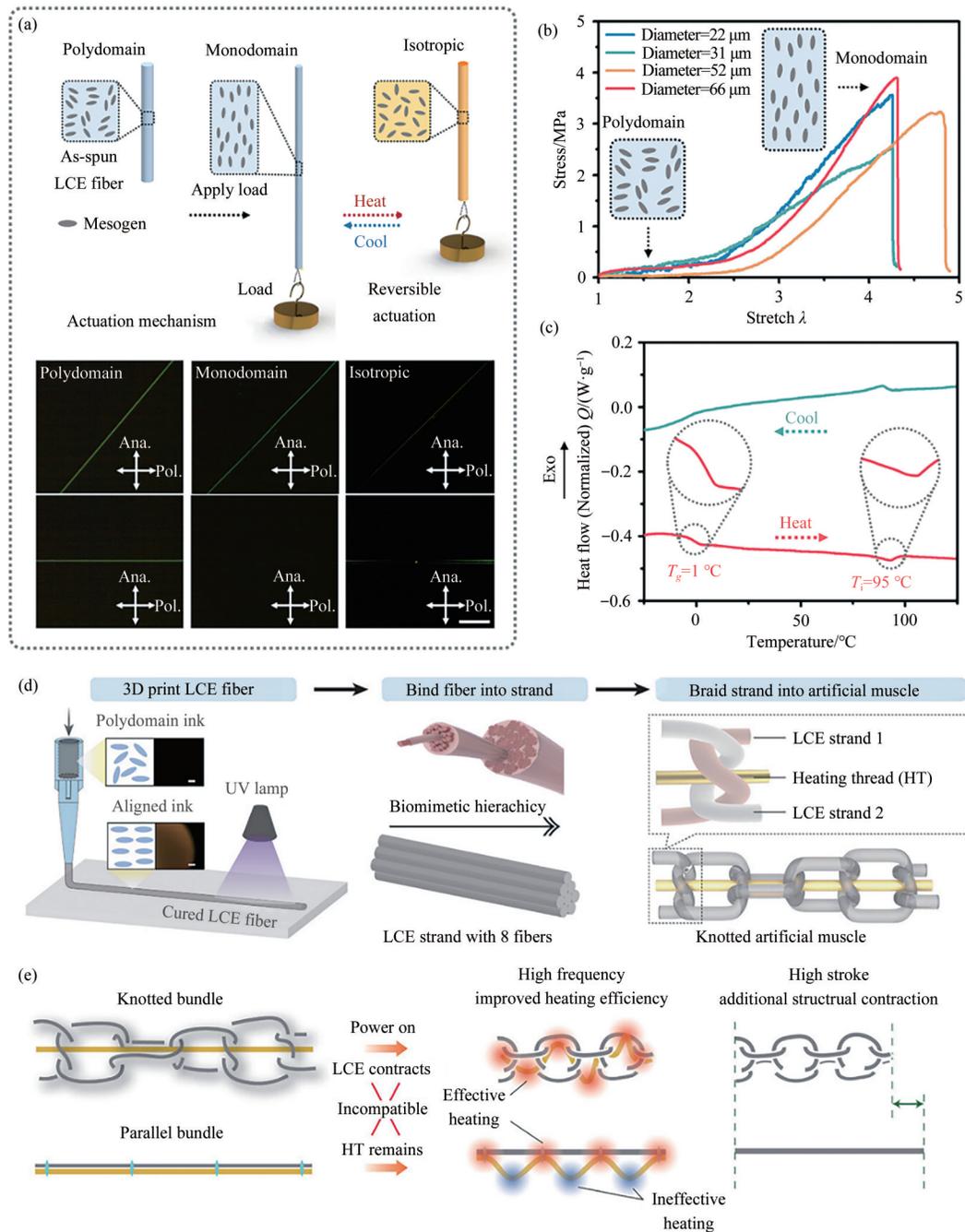


图 9 (a) 极细 LCE 驱动示意图及纤维在分析仪的两个不同角度观察的液晶弹性体微纤维的多结构域、单结构域和各向同性状态的 POM 图像。比例尺: 200 μm [中间], 20 μm [右]和 20 μm [底部]。(b) 不同直径(22~66 μm)的纺丝 LCE 超细纤维的单轴拉伸试验(25 $^{\circ}\text{C}$)^[62]。(c) LCE 超细纤维的 DSC 曲线。(d) 绳结人工肌肉的制造工艺。两个插图是打印液晶弹性体前后的 POM 图像(比例尺: 200 μm), 显示了液晶的排列。(e) 绳结结构放大了 LCE 材料的驱动性能, 带来高行程和高频驱动^[47]。

Fig. 9 (a) Actuation mechanism of LCE fiber and POM images of polydomain, monodomain, and isotropic states of LCE microfibers observed at two different angles with respect to the analyzer. Scale bars: 200 μm [middle], 20 μm [right], and 200 μm [bottom]. (b) Uniaxial tensile tests (at 25 $^{\circ}\text{C}$) of as-spun LCE microfibers with different diameters (22~66 μm). (c) DSC trace of as-spun LCE microfiber^[62]. (d) Fabrication process of knotted artificial muscles. The two insets are the POM images (scale bar: 200 μm) before and after the LCE is printed, showing the alignment of the liquid crystals. (e) Knotted structure greatly amplifies the actuation performance of the LCE material, leading to high stroke and high frequency actuation^[47].

构,显著提升了液晶弹性体人工肌肉的驱动应变和驱动速度,并展现出与自然肌肉相当的输出功(图9(d,e))。此外,结构优化还可以与化学改性相结合,通过对化学改性后的液晶弹性体人工肌肉进行结构优化,可以获得更优异的驱动性能^[67]。

5 液晶弹性体人工肌肉的应用

研究人员通过开发液晶弹性体人工肌肉的驱动方式,优化其驱动性能,获得能够远程控制的高性能液晶弹性体人工肌肉。这些人工肌肉的驱动性能可以达到甚至超过自然肌肉,从而

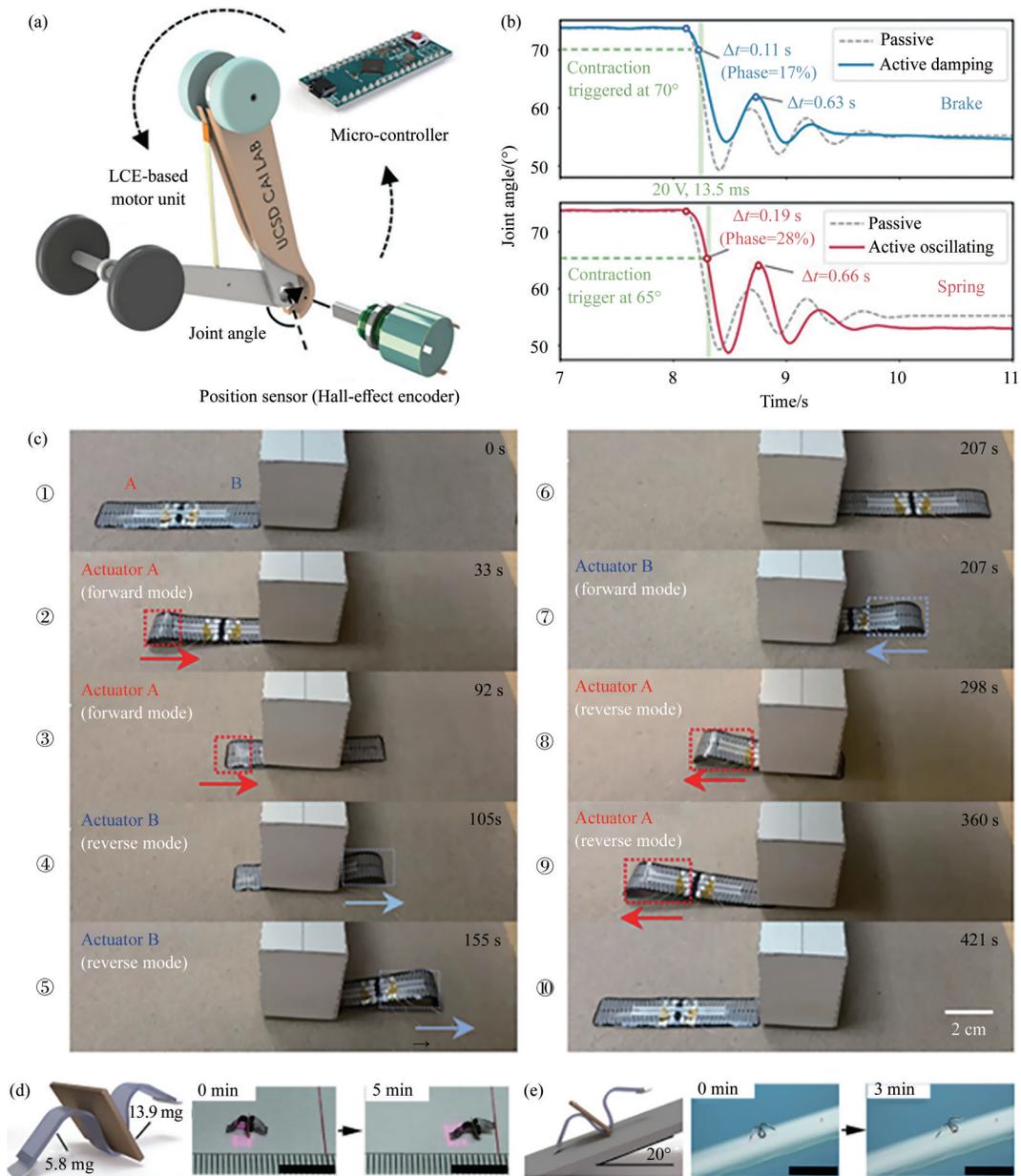


图 10 基于液晶弹性体人工肌肉的软体机器人。(a) 基于液晶弹性体人工肌肉的机械臂;(b) 通过控制基于 LCE 的运动单元的刺激时间,可以调节一次扰动后手臂的振荡动态^[46];(c) 基于液晶弹性体人工肌肉的狭缝机器人^[80];(d,e) 基于液晶弹性体人工肌肉的爬坡机器人^[81],比例尺:1 cm。

Fig. 10 Soft robot based on liquid crystal elastomer artificial muscles. (a) Robotic arm based on liquid crystal elastomer artificial muscles; (b) By controlling the stimulation time of the LCE-based motor unit, the oscillation dynamics of the arm after one perturbation can be tuned^[46]; (c) Slit robot based on liquid crystal elastomer artificial muscles^[80]; (d, e) Hill-climbing robot based on liquid crystal elastomer artificial muscles. Scale bar: 1 cm^[81].

取代沉重、复杂和大型的刚性设备,实现更高效服役,展现出强大的环境适应性。在软体机器人^[70-77]、医疗器械^[78-79]等领域,这些人工肌肉展现出巨大的潜力。

5.1 软体机器人

近年来,软体机器人发展迅速,而液晶弹性体人工肌肉因其与生物肌肉变形特性非常相似,在这一领域展现出巨大的潜力。与此同时,模板法的使用及3D打印技术的发展使得液晶弹性体人工肌肉非常易于制造,适合量产,价格低廉。并且这些液晶弹性体人工肌肉除了收缩以外,还可以通过结构的构造和变形方式的编程,实现如弯曲^[77-79]、爬行^[74-76]、扭转^[72-73]、抓取^[70-71]等动作。这种多功能性展示了它们在软体机器人领域的广泛应用潜力。如图10所示,由液晶弹性体人工肌肉驱动或构造的软体机器人可以执行多种任务。这些任务包括提拉重物^[46](图10(a,b))、狭缝穿梭^[80](图10(c))、载重爬坡^[81](图10(d))等。在完成这些任务的过程中,由液晶弹性体人工肌肉驱动的软体机器人展示了不亚于刚性机器人的性能,尤其在狭缝探索等极端任务中,表现出刚性机器人无法企及的灵活性和适应性,进一步凸显了在未来机器人技术中的潜力和应用价值。

此外,由液晶弹性体人工肌肉驱动的软体机器人在尺寸上具有极大的灵活性,不仅可以制备成小体积以用于狭缝等极端环境,实现监测等任务;也可以制备成较大尺寸以完成重负荷工作^[75]。这种扩展性使得软体机器人的制造成本和难度大幅下降。

除此之外,由液晶弹性体人工肌肉驱动的这些软体机器人还能够在水下甚至深海环境中运行^[47],展示出全环境适应的能力。基于水下环境对远程离线驱动的需求,液晶弹性体人工肌肉的驱动方式通常为电驱动。然而水环境有良好的散热效果,电驱动的液晶弹性体人工肌肉存在着高输入功率的情况,普通电池难以达到要求。在对液晶弹性体人工肌肉进行防水处理后,既可以减少热量的耗散并减少电输入,还能增大变形量从而进一步增强软体机器人的运动能力。

5.2 医疗器械

液晶弹性体人工肌肉能够通过电、磁等方式进行远程驱动,展现出了在远程手术上应用的潜力。许多内脏器官的手术由于手术空间狭小而难以完成,而由液晶弹性体人工肌肉驱动的全柔性手术器械可以通过医生远程实时的程序控制,在不伤害脏器的情况下完成这些手术^[82-83]。例如,通过使用由液晶弹性体人工肌肉驱动经过拓扑优化的柔顺机构,可以将液晶弹性体人工肌肉的变形转化为不同方向的位移输出,从而实现诸如给药和缝合等操作(图11)^[83]。这种技术不仅提高了手术的精确性和安全性,还增加了微创手术的可能性,从而在医疗领域展现出巨大的潜力和应用前景。

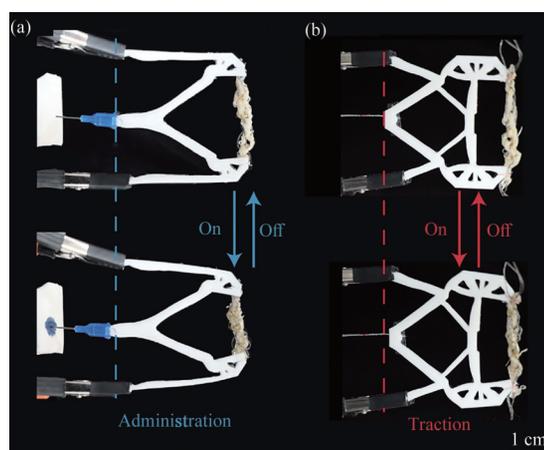


图11 (a) 体内手术主动柔顺机构的变形过程;(b) 主动柔顺机构的变形过程^[83]。

Fig. 11 (a) Deformation process of the active compliant mechanism for in vivo surgery; (b) Deformation process of the active compliant mechanism^[83].

液晶弹性体人工肌肉不仅可以用于远程操作医疗器械,其自身也可以复合药物。在液晶弹性体人工肌肉的制备过程中,加入促进伤口愈合的药物,可以制备出更加高效的伤口贴片。当这样的伤口贴片贴到创口处时,它能够在体温的刺激下产生收缩,从而拉紧创口周围的皮肤,缩小创口面积(图12)。这种创新的伤口贴片结合了机械和药物双重作用,大幅提升了愈合效果,为伤口处理提供了更为高效的解决方案^[82]。

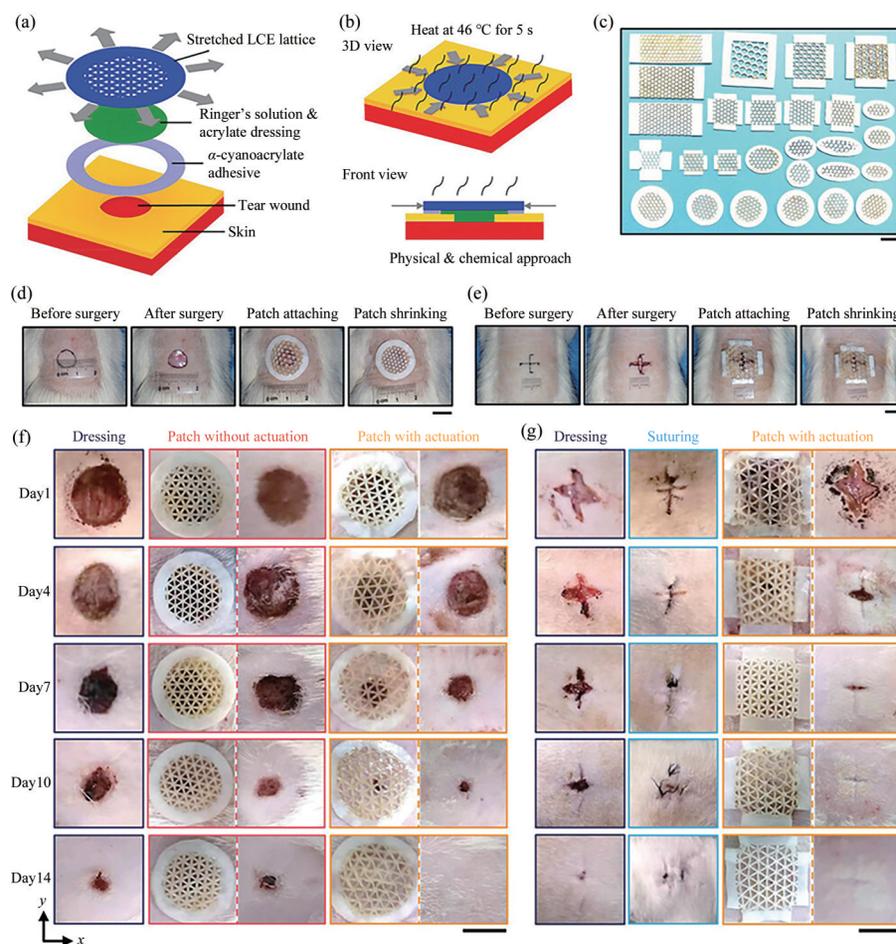


图 12 基于液晶弹性体人工肌肉的透气、可收缩、止血贴片,可增强大鼠模型中圆形和十字形伤口的皮肤再生。(a)由两层(即液晶弹性体人工肌肉和丙烯酸酯敷料)组成的可收缩止血贴片的示意图;(b)用于皮肤再生的可收缩止血贴片的工作机制示意图;(c)止血贴片的光学图像;(d~f)大鼠模型全层圆形皮肤伤口手术过程的光学图像。比例尺为 $1\text{ cm}^{[82]}$ 。

Fig. 12 Breathable, shrinkable, hemostatic patch for enhanced skin regeneration with round and cross-shaped wounds in a rat model based on liquid crystal elastomer artificial muscle. (a) Schematic illustration of the shrinkable, hemostatic patch consisting of two layers (*i.e.*, liquid crystal elastomer artificial muscle and acrylate dressing); (b) Schematic illustration of working mechanism of the shrinkable, hemostatic patch for skin regeneration; (c) Optical image for dozens of hemostatic patches; (d~f) Optical images for the process of full-thickness, round skin wound operation in a rat model. Scale bars is $1\text{ cm}^{[82]}$.

6 结 论

随着智能材料驱动器的发展,液晶弹性体因其可逆变形特性受到越来越多的关注。本文梳理了液晶弹性体在人工肌肉领域的研究进展。液晶弹性体具有与生物肌肉类似的可逆变形特性,通过化学改性和结构优化,它们可以展现出与自然肌肉相当或更优的驱动性能。针对不同的应用场景,通过驱动方式和变形方式的设计,液晶弹性体人工肌肉在软体机器人和医疗器械

领域展示了巨大的应用前景。然而,要满足实际应用的需求,液晶弹性体人工肌肉在力学性能和稳定性方面仍需改进。与气动或液压驱动器相比,液晶弹性体的力学强度尚难以匹敌。并且作为软材料,液晶弹性体人工肌肉的自由度较高,控制难度较大,因此尚未发展出精确的控制手段。但随着科学技术的进步,液晶弹性体人工肌肉的性能有望得到全面优化,同时,相应的控制技术也将逐步完善,从而在软体机器人等实际应用场景中展现出优异的表现。

参 考 文 献:

- [1] JAMES R S, ALTRINGHAM J D, GOLDSPIK D F. The mechanical properties of fast and slow skeletal muscles of the mouse in relation to their locomotory function [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1995, 198(2): 491-502.
- [2] BORIEK A M, CAPETANAKI Y, HWANG W, *et al.* Desmin integrates the three-dimensional mechanical properties of muscles [J]. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 2001, 280(1): C46-C52.
- [3] MIRVAKILI S M, HUNTER I W. Artificial muscles: mechanisms, applications, and challenges [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(6): 1704407.
- [4] ZHANG J, SHENG J, O'NEILL C T, *et al.* Robotic artificial muscles: current progress and future perspectives [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, 35(3): 761-781.
- [5] KANIK M, ORGUC S, VARNAVIDES G, *et al.* Strain-programmable fiber-based artificial muscle [J]. *Science*, 2019, 365(6449): 145-150.
- [6] HUANG J C, QIU L T, NI C J, *et al.* Shape memory polymers with patternable recovery onset regulated by light [J]. *Advanced Materials*, 2024, 2408324.
- [7] 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.
- [8] UMRAO S M, TABASSIAN R, KIM J, *et al.* MXene artificial muscles based on ionically cross-linked $Ti_3C_2T_x$ electrode for kinetic soft robotics [J]. *Science Robotics*, 2019, 4(33): eaaw7797.
- [9] DUDUTA M, HAJIESMAILI E, ZHAO H C, *et al.* Realizing the potential of dielectric elastomer artificial muscles [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(7): 2476-2481.
- [10] AMBULO C P, BURROUGHS J J, BOOTHBY J M, *et al.* Four-dimensional printing of liquid crystal elastomers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(42): 37332-37339.
- [11] PEI Z Q, YANG Y, CHEN Q M, *et al.* Mouldable liquid-crystalline elastomer actuators with exchangeable covalent bonds [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(1): 36-41.
- [12] KULARATNE R S, KIM H, BOOTHBY J M, *et al.* Liquid crystal elastomer actuators: synthesis, alignment, and applications [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2017, 55(5): 395-411.
- [13] SUN J B, WANG C, LIU Y J, *et al.* Liquid crystal elastomer composites for soft actuators [J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2023, 14(4): 440-459.
- [14] WANG X Y, JIANG J H, CHEN J, *et al.* Moiré effect enables versatile design of topological defects in nematic liquid crystals [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1655.
- [15] CHEN Y J, HUANG C L, CHI Y L, *et al.* A Bio-inspired light-driven soft climbing robot with capabilities of rapid locomotion, cargo transport, and direction turning [C]//*Proceedings of 2024 IEEE 37th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Austin, TX, USA: IEEE, 2024: 263-266.
- [16] MA J Z, YANG Y Z, ZHANG X, *et al.* Mechanochromic and ionic conductive cholesteric liquid crystal elastomers for biomechanical monitoring and human-machine interaction [J]. *Materials Horizons*, 2024, 11(1): 217-226.
- [17] SILVA P E S, LIN X Y, VAARA M, *et al.* Active textile fabrics from weaving liquid crystalline elastomer filaments [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(14): 2210689.
- [18] DONG X, ZHOU X S, LI L, *et al.* Monodomain liquid crystal elastomer bionic muscle fibers with excellent mechanical and actuation properties [J]. *iScience*, 2023, 26(4): 106357.
- [19] MAURIN V, CHANG Y, ZE Q, *et al.* Liquid crystal elastomer-liquid metal composite: ultrafast, untethered, and programmable actuation by induction heating [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(6): 2302765.
- [20] JIN B J, LIU J Q, SHI Y P, *et al.* Solvent-assisted 4D programming and reprogramming of liquid crystalline organogels [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(5): 2107855.
- [21] LI S, BAI H D, LIU Z, *et al.* Digital light processing of liquid crystal elastomers for self-sensing artificial muscles [J].

- Science Advances*, 2021, 7(30): eabg3677.
- [22] ROACH D J, YUAN C, KUANG X, *et al.* Long liquid crystal elastomer fibers with large reversible actuation strains for smart textiles and artificial muscles [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(21): 19514-19521.
- [23] QIU W L, HE X N, FANG Z M, *et al.* Shape-tunable 4D printing of LCEs via cooling rate modulation: stimulus-free locking of actuated state at room temperature [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(40): 47509-47519.
- [24] WU D S, LI X, ZHANG Y X, *et al.* Novel biomimetic “spider web” robust, super-contractile liquid crystal elastomer active yarn soft actuator [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(17): 2400557.
- [25] YANG H R, WU D S, ZHENG S M, *et al.* Fabrication and photothermal actuation performances of electrospun carbon nanotube/liquid crystal elastomer blend yarn actuators [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(7): 9313-9322.
- [26] JIANG Y Y, DONG X, WANG Q, *et al.* A high-fidelity preparation method for liquid crystal elastomer actuators [J]. *Langmuir*, 2022, 38(23): 7190-7197.
- [27] HONAKER L W, VATS S, ANYFANTAKIS M, *et al.* Elastic sheath-liquid crystal core fibres achieved by microfluidic wet spinning [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(37): 11588-11596.
- [28] MARTINEZ A P, NG A, NAH S H, *et al.* Active-textile yarns and embroidery enabled by wet-spun liquid crystalline elastomer filaments [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(34): 2400742.
- [29] LEI Y, YUAN Y, ZHAO S W, *et al.* Catalyst-free, highly sensitive and adjustable photo-responsive azobenzene liquid crystal elastomers based on dynamic multiple hydrogen bond [J]. *Polymer*, 2023, 269: 125737.
- [30] YAO Y W, WATERS J T, SHNEIDMAN A V, *et al.* Multiresponsive polymeric microstructures with encoded predetermined and self-regulated deformability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(51): 12950-12955.
- [31] BIM, SHAO Y B, WANG Y C, *et al.* Liquid crystalline elastomer doped with silver nanoparticles: fabrication and nonlinear absorption properties [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2017, 652(1): 41-50.
- [32] WU Z Y, CHENG P, ZHAO W G, *et al.* Allyl sulfide-based visible light-induced dynamically reshaped liquid crystalline elastomer/SWCNT nanocomposites capable of multimode NIR photomechanical actuations [J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(26): 10902-10910.
- [33] TANG D, ZHANG L, ZHANG X Y, *et al.* Bio-mimetic actuators of a photothermal-responsive vitrimer liquid crystal elastomer with robust, self-healing, shape memory, and reconfigurable properties [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(1): 1929-1939.
- [34] LU H F, WANG M, CHEN X M, *et al.* Interpenetrating liquid-crystal polyurethane/polyacrylate elastomer with ultrastrong mechanical property [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(36): 14364-14369.
- [35] SHAHA R K, TORBATI A H, FRICK C P. Body-temperature shape-shifting liquid crystal elastomers [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(14): 50136.
- [36] SUN J H, LIAO W, YANG Z Q. Additive manufacturing of liquid crystal elastomer actuators based on knitting technology [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(36): 2302706.
- [37] LUGGER S J D, ENGELS T A P, CARDINAELS R, *et al.* Melt-extruded thermoplastic liquid crystal elastomer rotating fiber actuators [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(49): 2306853.
- [38] KOTIKIANA, MORALES J M, LU A, *et al.* Innervated, self-sensing liquid crystal elastomer actuators with closed loop control [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(27): 2101814.
- [39] KENT T A, FORD M J, MARKVICKA E J, *et al.* Soft actuators using liquid crystal elastomers with encapsulated liquid metal joule heaters [J]. *Multifunctional Materials*, 2020, 3(2): 025003.
- [40] LI Z F, OLSON G, PATEL D K, *et al.* Electrically controlled liquid crystal elastomer surfaces for dynamic wrinkling [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2024, 6(2): 2200402.
- [41] LIU K, HACKER F, DARAIO C. Robotic surfaces with reversible, spatiotemporal control for shape morphing

- and object manipulation [J]. *Science Robotics*, 2021, 6(53): eabf5116.
- [42] FRICK C P, MERKEL D R, LAURSEN C M, *et al.* Copper-coated liquid-crystalline elastomer via bioinspired polydopamine adhesion and electroless deposition [J]. *Macromol. Rapid Commun.*, 2016, 37(24): 1912-1917.
- [43] HE Q G, WANG Z J, WANG Y, *et al.* Electrically controlled liquid crystal elastomer-based soft tubular actuator with multimodal actuation [J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax5746.
- [44] WANG M, CHENG Z W, ZUO B, *et al.* Liquid crystal elastomer electric locomotives [J]. *ACS Macro Letters*, 2020, 9(6): 860-865.
- [45] SUN J H, WANG Y P, LIAO W, *et al.* Ultrafast, high-contrast electrothermal-driven liquid crystal elastomer fibers towards artificial muscles [J]. *Small*, 2021, 17(44): 2103700.
- [46] WANG Y, HE Q G, WANG Z J, *et al.* Liquid crystal elastomer based dexterous artificial motor unit [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(17): 2211283.
- [47] CHEN W H, TONG D Z, MENG L H, *et al.* Knotted artificial muscles for bio-mimetic actuation under deepwater [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(27): 2400763.
- [48] SUN Y X, WANG L, ZHU Z Q, *et al.* A 3D-printed ferromagnetic liquid crystal elastomer with programmed dual-anisotropy and multi-responsiveness [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(45): 2302824.
- [49] ESPÍNDOLA-PÉREZE R, CAMPO J, SÁNCHEZ-SOMOLINOS C. Multimodal and multistimuli 4D-printed magnetic composite liquid crystal elastomer actuators [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(2): 2704-2715.
- [50] WU Y H, ZHANG S, YANG Y, *et al.* Locally controllable magnetic soft actuators with reprogrammable contraction-derived motions [J]. *Science Advances*, 2022, 8(25): eabo6021.
- [51] HERRERA-POSADA S, MORA-NAVARRO C, ORTIZ-BERMUDEZ P, *et al.* Magneto-responsive liquid crystalline elastomer nanocomposites as potential candidates for dynamic cell culture substrates [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, 65: 369-378.
- [52] ZHANG J C, GUO Y B, HU W Q, *et al.* Liquid crystal elastomer-based magnetic composite films for reconfigurable shape-morphing soft miniature machines [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(8): 2006191.
- [53] LIU L, LIU M H, DENG L L, *et al.* Near-infrared chromophore functionalized soft actuator with ultrafast photoresponsive speed and superior mechanical property [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(33): 11333-11336.
- [54] WU Z Y, LIU L, CHENG P, *et al.* Reusable gold nanorod/liquid crystalline elastomer (GNR/LCE) composite films with UV-triggered dynamic crosslinks capable of micropatterning and NIR actuation [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(45): 14245-14254.
- [55] HUANG Y L, XU Y Y, BISOYI H K, *et al.* Photocontrollable elongation actuation of liquid crystal elastomer films with well-defined crease structures [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(36): 2304378.
- [56] JI Y, Huang Y Y, RUNGSAWANG R, *et al.* Dispersion and alignment of carbon nanotubes in liquid crystalline polymers and elastomers [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(31): 3436-3440.
- [57] LEI B, WEN Z Y, WANG H K, *et al.* Bioinspired jumping soft actuators of the liquid crystal elastomer enabled by photo-mechanical coupling [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(1): 1596-1604.
- [58] CHEN J, JOHNSON A S, WEBER J, *et al.* Programmable light-driven liquid crystal elastomer kirigami with controlled molecular orientations [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(7): 2100233.
- [59] CHEN J, JIANG J H, WEBER J, *et al.* Shape morphing by topological patterns and profiles in laser-cut liquid crystal elastomer kirigami [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(3): 4538-4548.
- [60] CREMONINI A, SOL J A H P, SCHENNING A P H J, *et al.* The interplay between different stimuli in a 4D printed photo-, thermal-, and water-responsive liquid crystal elastomer actuator [J]. *Chemistry—A European Journal*, 2023, 29(36): e202300648.
- [61] KIM K, GUO Y H, BAE J, *et al.* 4D printing of hygroscopic liquid crystal elastomer actuators [J]. *Small*, 2021,

- 17(23): 2100910.
- [62] HE Q G, WANG Z J, WANG Y, *et al.* Electrospun liquid crystal elastomer microfiber actuator [J]. *Science Robotics*, 2021, 6(57): eabi9704.
- [63] CHAMBERS M, FINKELMANN H, REMSKAR M, *et al.* Liquid crystal elastomer-nanoparticle systems for actuation [J]. *The Royal Society of Chemistry*, 2009, 19(11): 1524-1531.
- [64] SHENOY D K, LAURENCE THOMSEN III D, SRINIVASAN A, *et al.* Carbon coated liquid crystal elastomer film for artificial muscle applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, 96(2-3): 184-188.
- [65] BRANNUM M T, STEELE A M, VENETOS M C, *et al.* Light control with liquid crystalline elastomers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(6): 1801683.
- [66] SAED M O, VOLPE R H, TRAUGUTT N A, *et al.* High strain actuation liquid crystal elastomers *via* modulation of mesophase structure [J]. *Soft Matter*, 2017, 13(41): 7537-7547.
- [67] YU Y, HU H Y, DAI Y T, *et al.* Modeling the light-powered self-rotation of a liquid crystal elastomer fiber-based engine [J]. *Physical Review E*, 2024, 109(3): 034701.
- [68] ZHANG L M, LIU J H, SHANG P Y, *et al.* Polydopamine-coated gold nanorods for liquid crystal actuators driven by near-infrared light [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 23(7): 26414-26422.
- [69] XU S H, HAO Z X, CHEN X D, *et al.* Viscoelastic dynamics of photothermal-responsive liquid crystal elastomer fibers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(19): 2311425.
- [70] GUO H S, RUOKO T P, ZENG H, *et al.* Hydrogen-bonded liquid crystal elastomers combining shape memory programming and reversible actuation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(10): 2312068.
- [71] LI Y, YU H B, YU K, *et al.* Reconfigurable three-dimensional mesostructures of spatially programmed liquid crystal elastomers and their ferromagnetic composites [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(23): 2100338.
- [72] QI F J, LI Y B, HONG Y Y, *et al.* Defected twisted ring topology for autonomous periodic flip-spin-orbit soft robot [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(3): e2312680121.
- [73] NIE Z Z, WANG M, HUANG S, *et al.* Multimodal self-sustainable autonomous locomotions of light-driven Seifert ribbon actuators based on liquid crystal elastomers [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(25): e202304081.
- [74] LI L, XU J W, LI Q Y, *et al.* Small multi-attitude Soft amphibious robot [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(2): 1067-1073.
- [75] LI Y, LIU Y J, LUO D. Circularly polarized light-driven liquid crystal elastomer actuators [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(7): 2202695.
- [76] LIU C Y, LI K, YU X Z, *et al.* A multimodal self-propelling tensegrity structure [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(25): 2314093.
- [77] ZHOU X R, CHEN G C, JIN B J, *et al.* Multimodal autonomous locomotion of liquid crystal elastomer soft robot [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(23): 2402358.
- [78] YAN Y X, WU Y H, WANG Q, *et al.* Photo-responsive bilayer soft actuators synergic fluorescence and shape change towards biomimetic untethered camouflage robots [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(8): 2203019.
- [79] 翟飞, 封伟. 4D打印液晶弹性体软体机器人及其热致运动行为[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1389-1396.
ZHAI F, FENG W. 4D printed liquid crystal elastomer soft robot and its thermal derived motion behavior [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1389-1396. (in Chinese)
- [80] WU S, HONG Y Y, ZHAO Y, *et al.* Caterpillar-inspired soft crawling robot with distributed programmable thermal actuation [J]. *Science Advances*, 2023, 9(12): eadf8014.
- [81] LIANG R X, YU H J, WANG L, *et al.* Light-guided dynamic liquid crystalline elastomer actuators enabled by mussel adhesive protein chemistry [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(9): 2211914.
- [82] WU J, YAO S L, ZHANG H, *et al.* Liquid crystal elastomer metamaterials with giant biaxial thermal shrinkage for

enhancing skin regeneration [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(45): 2106175.

- [83] CHEN W H, WANG R C, LIU K. Active compliant mechanisms for optimized actuation by LCE-based artificial muscles [J]. *Mechanics of Materials*, 2024, 189: 104879.

作者简介:



陈雯慧,女,博士研究生,2022年于武汉大学获得硕士学位,主要从事智能材料软体机器人的研究。E-mail: chenwenhui@stu.pku.edu.cn



刘珂,男,博士,研究员,2019年于佐治亚理工大学获得博士学位,主要从事智能结构设计、软体机器人的研究。E-mail: liuke@pku.edu.cn



周晓航,男,大学本科在读,主要从事先进制造与机器人的研究。E-mail: zhouxiaohang@stu.pku.edu.cn