

文章编号: 1007-2780(2025)01-0013-13

液晶弹性体柔性气动驱动器

廖威¹, 陈植冰^{2#}, 马佳哲², 杨忠强^{2,3*}

- 中国航发北京航空材料研究院 先进复合材料科技重点实验室, 北京 100095;
- 清华大学 化学系 有机光电子与分子工程教育部重点实验室, 北京 100084;
- 清华大学 柔性电子技术实验室, 北京 100084)

摘要: 液晶弹性体柔性驱动器凭借其独特的液晶各向异性与橡胶软弹性, 展现出对多元刺激的灵敏响应能力及执行复杂大形变驱动的能力, 成为科研领域的研究热点。其中, 液晶弹性体柔性气动驱动器由于具有驱动方式简易, 驱动条件温和等特点而备受关注。近年来, 科研工作者们围绕丰富液晶弹性体柔性气动驱动器的驱动模式、提高其响应速度与回复速度展开研究, 并拓宽了其力学应用与光学应用。本文综述了液晶弹性体柔性气动驱动器的最新研究动态, 介绍了其反常力学行为, 并前瞻性地讨论了该技术在力学领域与光学领域的潜在应用前景, 为相关领域的研究与发展提供了新视角与启示。

关键词: 液晶弹性体; 驱动器; 气动驱动; 柔性; 刺激响应性; 智能材料

中图分类号: O753⁺.2 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2024-0299 CSTR: 32172.14.CJLCD.2024-0299

Liquid crystal elastomer soft pneumatic actuators

LIAO Wei¹, CHEN Zhibing^{2#}, MA Jiazhe², YANG Zhongqiang^{2,3*}

- Key Laboratory of Advanced Composite, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
- Key Laboratory of Organic Optoelectronics & Molecular Engineering of the Ministry of Education, Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
- Laboratory of Flexible Electronic Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Liquid crystal elastomer soft actuators, with their unique liquid crystal anisotropy and rubber soft elastic properties, have shown sensitive response to multiple stimuli and the ability to perform complex large deformation, which has become a research hotspot in the field of scientific research. Among them, liquid crystal elastomer soft pneumatic actuators have attracted much attention due to their simple actuation mode and mild actuation-conditions. Recently, researchers have studied the actuation mode, response speed, and recovery speed of liquid crystal elastomer soft pneumatic actuators, and broadened their mechanical and optical applications. In this review, the latest research trends of liquid crystal

收稿日期: 2024-10-01; 修订日期: 2024-10-22.

基金项目: 清华大学笃实专项资金

Supported by Tsinghua University Dushi Program

*共同第一作者

*通信联系人, E-mail: zyang@tsinghua.edu.cn

elastomer soft pneumatic actuators are reviewed, their abnormal mechanical behavior is introduced, and the potential application prospects of this technology in the fields of mechanics and optics are discussed prospectively, which provides a new perspective and enlightenment for the research and development of related fields.

Key words: liquid crystal elastomer; actuators; pneumatic actuation; flexibility; stimulus responsiveness; smart materials

1 引 言

液晶弹性体 (Liquid Crystal Elastomer, LCE) 作为一种智能响应形变材料^[1], 由于其基于相变的大幅可逆响应形变性能, 获得众多研究人员的关注和青睐, 被广泛应用于软体机器人^[2]、人工肌肉^[3-5]、智能织物^[6-8]等领域, 成为构筑柔性驱动器的重要材料之一。

LCE 柔性驱动器通常依赖外场刺激引发液晶基元取向改变, 导致材料发生宏观变形从而实现特定的驱动模式, 比如热场刺激通过温度变化引发取向的液晶基元在有序和无序间可逆转变引发形变^[9-12]; 光场刺激则通过光致异构化^[13-16]或光热效应^[17-25]诱导液晶基元取向改变产生形变; 电场和磁场通过高强度电场或磁场引起具有铁电性或磁极的液晶基元发生偏转产生形变, 或通过电热效应^[26-32]与磁热效应诱导形变。此外, LCE 柔性驱动器还能通过掺入化学反应性基团实现物质气氛中的化学驱动^[33], 或通过利用其本征的结构特性或掺入的基团与物质气氛进行物理相互作用实现物理驱动^[34]。另外, LCE 柔性气动驱动器还能够通过介电驱动^[35-38]。然而, 这些驱动方式均面临着相应的难题, 比如温度场刺激驱动虽然相比于其他刺激方式更容易实现^[39], 却存在温度精确控制困难、驱动温度普遍较高的问题^[40]; 光场刺激驱动方式可以实现非接触驱动及多自由度编程^[41], 且具有很高的时间和空间精度^[42], 但是驱动变形量小, 变化形式单一; 电场和磁场驱动控制精确, 但是所需驱动设备复杂^[43]。在这样的背景下, 气动驱动由于驱动方式简易、驱动条件温和等优势, 在 LCE 研究领域得到与日俱增的关注^[44]。

LCE 气动驱动器结合了 LCE 的大幅可逆响应形变性能以及气动驱动的便捷、条件温和等特点, 具有更高的接触安全性和适应性, 拓宽了驱

动器的应用场景。值得注意的是, LCE 气动驱动器在材料应变的基础原理上与传统柔性气动驱动器具有差别。传统柔性气动驱动器由各向同性的材料构筑而成, 需要引入异质结构或增强材料从而产生结构的力学各向异性完成预期的形变^[45-52]。而 LCE 构筑的柔性驱动器则利用 LCE 本征的力学各向异性完成相应驱动^[53-54], 具有更高的材料利用效率和稳定性。因此, LCE 柔性气动驱动器不仅为 LCE 驱动提供了一种新的驱动方式, 也为传统柔性气动驱动器的构筑提供了一种新的思路。

近年来, 科研工作者们也针对液晶弹性体柔性气动驱动器存在的难点提出了一系列的解决方案: 通过旋转 3D 打印技术对液晶基元取向进行精确控制, 实现可编程的驱动模式以解决液晶弹性体柔性气动驱动器驱动模式单一的问题; 通过多刺激响应策略解决液晶弹性体柔性气动驱动器驱动速度慢的问题; 研究了液晶弹性体柔性气动驱动器在光学显示方面的应用以拓宽其应用范围。

本文回顾了近年来 LCE 柔性气动驱动器相关领域的研究进展, 主要介绍了 LCE 柔性气动驱动器的反常力学行为及其导致的力学应用, 并简要介绍了其在光学应用方面的探索, 最后归纳了 LCE 柔性气动驱动器依旧存在的挑战并展望了其未来发展思路。

2 LCE 气动驱动器的反常力学行为

传统气动驱动器一般使用各向同性的弹性体构筑形变气腔, 其力学行为在过去的几十年里已得到广泛研究^[55]。图 1 展示了橡胶制备的传统管状气动驱动器的加压变形过程。随着充气压力的增加, 传统气动驱动器的半径和长度都略有扩大。当压力达到临界值时, 会形成一个凸起。

随着充气量的增加,凸起从气腔的一端扩展到另一端,同时驱动器伸长。

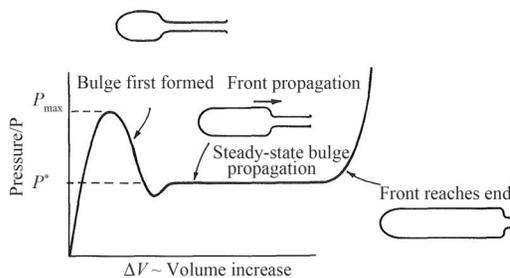


图1 传统柔性气动驱动器的气动驱动过程^[55]

Fig.1 Process of inflating a traditional soft pneumatic actuator^[55]

相较于使用各向同性弹性体构筑的传统柔性气动驱动器,LCE柔性气动驱动器则采用了具有特定取向、各向异性的LCE作为气室。由于LCE在分子尺度上结合了液晶基元与聚合物网络,因此液晶基元的旋转与聚合物网络的形变相互耦合,在气动驱动时会表现出与各向同性弹性体构筑的传统柔性气动驱动器截然不同的反常

力学行为^[56]。

2020年,加州大学圣地亚哥分校的Shengqiang Cai课题组通过模板法两步聚合合成了管状的LCE柔性气动驱动器^[57]。如图2(a)所示,首先将LCE前驱体溶液缓慢注入特制的圆柱形模具内进行初步交联反应,形成初始的交联网络。其后,通过机械拉伸将初步成型的管状结构均匀拉伸至其原始长度的2倍,并在此状态下进行二次交联,从而促使液晶基元在拉伸力的诱导下沿轴向取向排列。

为探索该新型驱动器的性能,该研究团队对制备的LCE柔性气动驱动器的气动行为进行了深入研究与分析。如图2(b)所示,实验观察到了一种反常力学行为:在气压初始缓慢增加阶段,该驱动器展现出了独特的形态变化——管状气腔在轴向发生收缩的同时,在径向方向上则显著膨胀。随着气压的持续升高,径向膨胀占据主导,而轴向长度则维持相对稳定。最终,在达到某一临界气压值时,已变形的气腔经历了一个突然、近乎同步的径向与轴向膨胀过程。若此时气压再有微小增加,则会触发气腔的破裂。

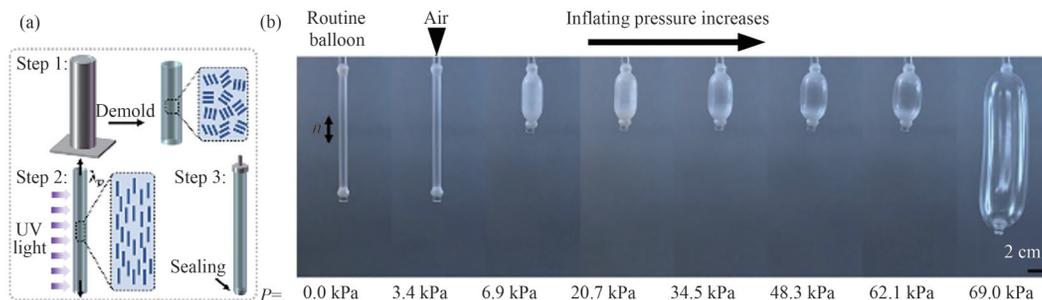


图2 (a)模板法制备LCE柔性气动驱动器示意图^[57];(b)LCE柔性气动驱动器的充气过程,标尺:2 cm^[57]。

Fig.2 (a) Schematic diagram of preparing liquid crystal elastomer soft pneumatic actuators by template method^[57]; (b) Process of inflating the liquid crystal elastomer soft pneumatic actuator, scale bar: 2 cm^[57].

为解释观察到的反常力学行为,该课题组巧妙地引入了向列相弹性体的准凸自由能函数框架,构建了一个具有高度预测能力的非线性弹性理论模型。如图3(a~c)所示,该模型详尽模拟了充气压力与气腔多维度尺寸变化(包括气腔长度、半径以及总体积)之间的动态关系,其预测结果与实验观测数据高度契合,表明该模型的高精度与可靠性。

值得一提的是,该模型成功预测了LCE柔

性气动驱动器的反常力学行为源自于LCE内部的液晶基元旋转的临界应力和软弹性平台区。具体而言,如图4所示,当应力施加于与初始液晶基元取向相垂直的方向时,LCE的应力最初随应变线性增加。在达到临界点后,应力突然下降,然后随着应变的增加逐渐缓慢增加,进入软弹性平台期并伴随着液晶基元发生旋转。换句话说,液晶基元发生旋转需要临界应力。在达到临界应力之前,尽管应力增加,液晶基元的

取向几乎没有变化。然而一旦达到临界应力,应力的轻微增加就会触发液晶基元的旋转,并伴随着应变的显著变化^[1,58]。因此对于 LCE 柔性气动驱动器的反常力学行为可做以下解释:在充气气压达到临界气压前,由于尚未达到临界应力,液晶基元基本不旋转,因此气室体积基

本不变。而当充气气压达到临界气压时,由于达到临界应力并触发原本沿轴向取向的液晶基元的旋转,导致驱动器在径向膨胀并在轴向收缩。当气压进一步提高时,由于液晶基元完全旋转 90°,径向力学性质陡增,因此轴向不再收缩而发生膨胀。

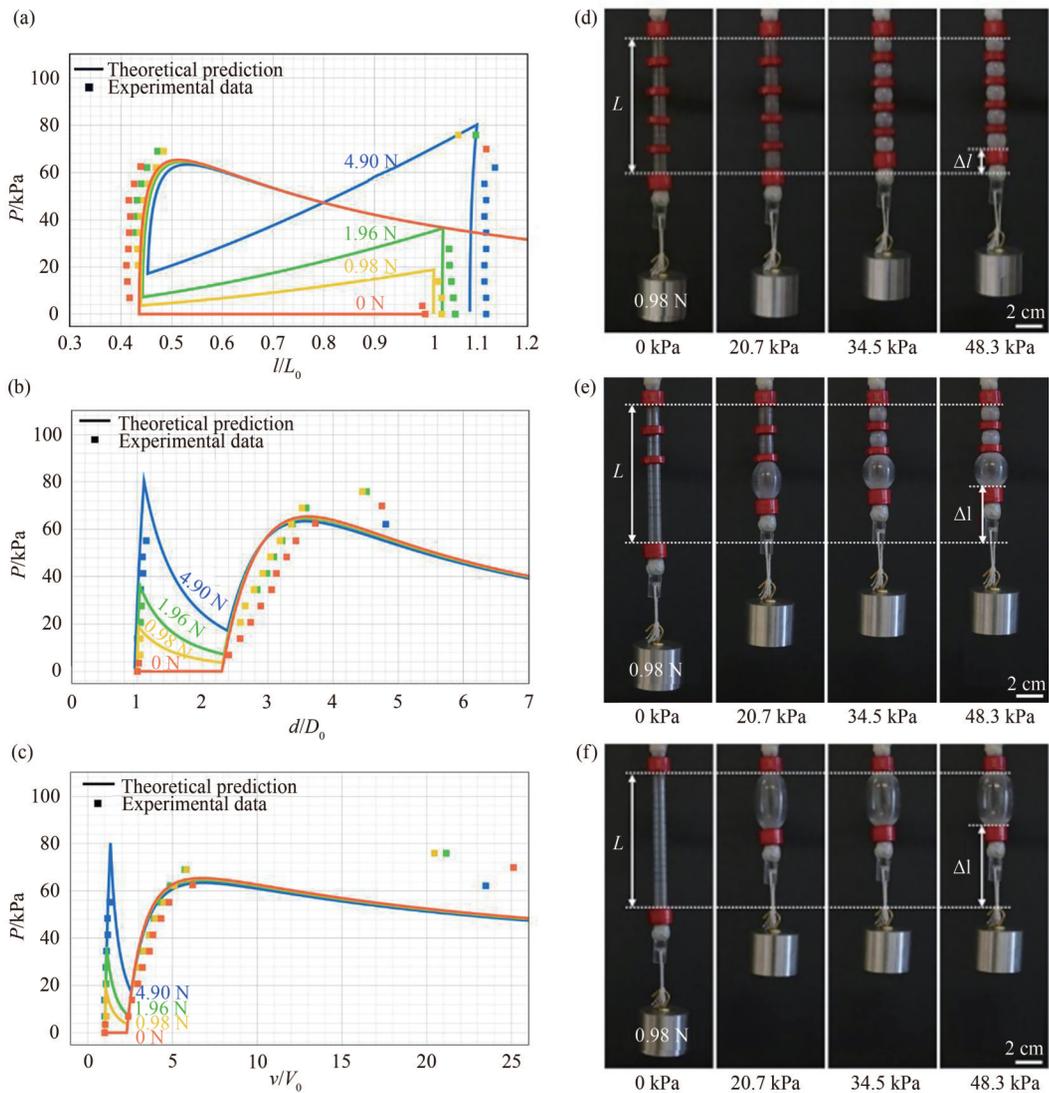


图 3 在承受不同大小的轴向载荷下的(a)充气压力与气腔长度变化的关系^[57]、(b)充气压力与气腔直径变化的关系^[57]、(c)充气压力与气腔体积变化的关系^[57],图(a~c)中的点代表实际实验数据,曲线为理论模型的预测结果;(d)气腔充气诱导轴向收缩,该气腔被刚性环(红色)均匀地分成5个短段^[57];(e)同一气腔充气诱导轴向收缩,分为3个不同长度的段^[57];(f)气腔充气诱导轴向收缩^[57]。

Fig. 3 Under different magnitude axial loads, (a) the variation of inflation pressure versus chamber length^[57], (b) relationship between inflation pressure and chamber diameter^[57], (c) relationship between inflation pressure and chamber volume change^[57], the points in (a~c) represent the actual experimental data, and the curves are the predictions of the theoretical model; (d) Inflated axial contraction of the chamber, which is evenly divided into five short segments by rigid rings (red)^[57]; (e) Inflatable axial contraction of the same chamber, divided into three segments of different lengths^[57]; (f) Inflation of the chamber induces axial contraction^[57].

以管状结构为例,相较于传统气动器件的力学行为,可以发现液晶弹性体柔性气动驱动器的异常力学行为导致在一定范围的气动驱动下出现了反向收缩现象。相反,传统气动器件在气动驱动下进行伸长运动。因此基于该反向收缩现象,液晶弹性体柔性气动驱动器可用作气动人工肌肉以提升重物。如图3(d~f)所示,该课题组通过在LCE气腔上装配刚性环以实现驱动器连续可调收缩,并将其用作气动人工肌肉以提升重物。

总之,由于LCE的各向异性特征以及其中液晶基元在外部应力作用下的动态旋转特性,LCE柔性气动驱动器展现出与传统柔性气动驱动器截然不同的力学响应模式。深入剖析这一异常力学行为,不仅揭示了材料内部复杂而精细的相互作用机制,更有利于我们进一步探索其应用潜力。

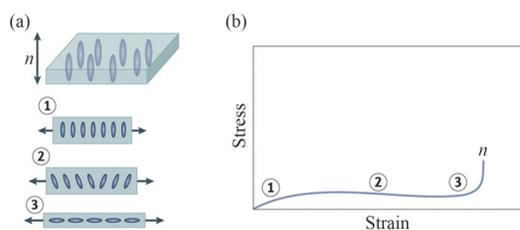


图4 (a)液晶弹性体的机械响应示意图^[58],其中应力方向与初始液晶基元方向相垂直,①、②、③代表随应变施加时间的推移,液晶弹性体中液晶基元的相应变化;(b)图4(a)模型的应变-应力曲线示意图^[58]。

Fig. 4 (a) Schematic diagram of the mechanical response of a liquid crystal elastomer, where the direction of stress is perpendicular to the direction of the initial liquid crystal orientation^[58], ①, ②, and ③ represent the corresponding change in the liquid crystal mesogen in a liquid crystal elastomer with the passage of time when the strain is applied; (b) Schematic diagram of the strain-stress curve of the model in Fig. 4(a)^[58].

3 LCE柔性气动驱动器的研究与应用

目前,研究人员已在LCE柔性气动驱动器的制备及应用领域进行了一系列探索,但在以下方面仍存在瓶颈:LCE柔性气动驱动器的驱动模式较为单一,主要为收缩形变;驱动响应速度与回复速度缓慢;应用范围局限于力学领域,限制了

其应用价值。

针对以上问题,研究者们结合LCE的独特性质,提出相应的解决方案:通过可控编程液晶基元的取向,丰富LCE柔性气动驱动器的驱动模式;通过热-气动增强策略提升其驱动响应速度与回复速度;通过复合材料策略拓宽其在光学领域应用。

3.1 可编程取向研究与应用

由于液晶基元的旋转与聚合物网络的形变相互耦合,因此LCE柔性气动驱动器的液晶基元取向与其驱动行为密切相关。通过可控编程液晶基元的取向,能够实现不同的驱动模式以适用多样化的应用场景。

2023年,清华大学的杨忠强课题组通过旋转3D打印法构建了一种管状LCE柔性气动驱动器^[59]。该团队通过在旋转基底上3D打印LCE,从而构建表面取向精准可控的LCE柔性气动驱动器。通过对打印路径进行可控编程设计,可以精确控制LCE驱动器不同区域的液晶基元的取向,从而实现不同的驱动模式。如图5(a,b)所示,该团队通过编程打印路径,构建了一系列的具有可控三维取向的LCE柔性气动驱动器,并利用液晶基元取向产生的力学各向异性实现不同的气动模式:收缩(图5(c))、伸长(图5(d))和扭转(图5(e))。

具有不同气动模式的LCE柔性气动驱动器能够通过合理的结构设计、组装等实现实际应用功能。图5(f)展示了具有收缩和伸长形变的LCE柔性气动驱动器能够在气压变化下提起重物,具有作为气动人工肌肉的潜力。此外,基于LCE柔性气动驱动器的弯曲模式,由3个可弯曲形变LCE柔性气动驱动器构成的三指柔性抓手在驱动后可以成功抓住并提起重物(图5(g))。基于LCE柔性气动驱动器的扭转模式,所制备的搅拌器能够以0.5 Hz的频率在30 s内搅拌均匀30 mL的液体(图5(h))。

综上所述,借助旋转3D打印技术,可以实现对液晶基元三维取向的精准可控编程,进而赋予LCE柔性气动驱动器可编程设计的驱动模式。这一突破性进展丰富了LCE柔性气动驱动器的驱动模式,为其在实际场景中的多功能应用奠定基础。

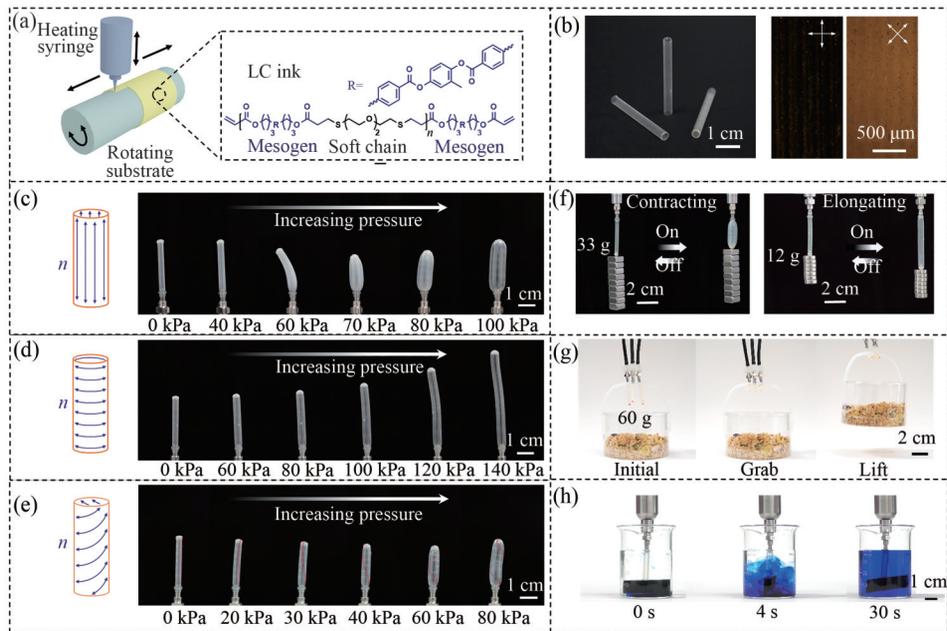


图 5 (a) 旋转 3D 打印法制备 LCE 中空管示意图^[59]; (b) 左侧为打印获得的 LCE 中空管的照片^[59], 右侧为轴向取向的 LCE 中空管的偏光图像; (c) 轴向取向^[59]、(d) 环向取向^[59]、(e) 螺旋取向 LCE 柔性气动驱动器的取向示意图以及在气压驱动下的图像^[59]; (f) LCE 柔性气动驱动器负载提起重物^[59], 左侧为轴向取向的驱动器在加压后提起 33 g 的重物的图片, 右侧为环向取向的驱动器在减压后提起 12 g 的重物的图片; (g) 由 3 个 LCE 柔性气动驱动器组装成的柔性抓手抓持并提起一个盛有谷物的篮子的图片^[59]; (h) 由螺旋取向的 LCE 柔性气动驱动器组装成的搅拌器在 80 kPa 的气压驱动下以 0.5 Hz 的频率搅拌烧杯中的墨水与纯净水混合物^[59]。

Fig. 5 (a) Schematic diagram of preparing LCE hollow tubes by rotational 3D printing method^[59]; (b) On the left is a photograph of the LCE hollow tube^[59], on the right is the polarized images of an axially oriented LCE hollow tube; Schematic diagram of the orientations of LCE soft pneumatic actuators and their image after inflation: (c) an axially oriented actuator^[59], (d) a circumferentially oriented actuator^[59] and (e) a spiral-oriented actuator^[59]; (f) LCE soft pneumatic actuators loads lifting heavy loads^[59], on the left is a picture of an axially oriented drive lifting a 33 g weight after inflation, on the right is a picture of a circumferentially oriented actuator lifting a 12 g weight after deflation; (g) Picture of a soft gripper assembled from three LCE soft pneumatic actuators catching and lifting a basket containing grain^[59]; (h) A stirrer assembled from a spiral-oriented LCE soft pneumatic actuator stirred the ink and purified water mixture in the beaker at a frequency of 0.5 Hz under the air pressure of 80 kPa^[59].

3.2 多刺激响应的研究与应用

尽管已经利用旋转 3D 打印技术实现了可编程化的驱动模式,然而,LCE 柔性气动驱动器走向实际应用依旧面临着气动响应速度以及回复速度缓慢的困难。这是因为 LCE 进行气动驱动时需要较长时间才能实现液晶基元的偏转和恢复,限制了 LCE 柔性气动驱动器的实际应用^[60]。因此,提升 LCE 柔性气动驱动器的响应速度与回复速度至关重要。通过多种刺激的协同增强或许能够有效提升气动响应速度以及回复速度,然而目前的多刺激响应研究更多是使驱动器独立响应每个刺激,而不是同时响应多个刺激,因此从并发刺激中获得增强的效果仍然是一个挑战。

为解决这一问题,2024 年,清华大学杨忠强团队提出了一种新型的热-气双重驱动的多刺激响应机制,通过热致相变和力致液晶基元转动的增强效应提高 LCE 气动驱动器的驱动速度^[61]。如图 6 所示,他们开发了一种新型、简便的溶剂蒸发辅助模板法,并成功制备出一种轴向取向的纤维状 LCE 柔性气动驱动器。具体而言,以 RM257 为液晶基元、DODT 为间隔基和 PETMP 为交联剂的混合物均匀溶解于乙酸乙酯中(图 6(a)),并加入 IG651 与 DPA 引发双键与巯基之间的加成反应。随后将得到的 LCE 混合物填充至硅胶管模板中,置于真空环境中加速体系内乙酸乙酯溶胀硅胶模板并透过管壁挥发,形成 LCE 中空纤维。

最后,将硅胶管拉伸至原长的 2 倍,在紫外光照射下进行第二步交联反应,随后脱模得到沿轴向取

向、内径与外径分别为约 0.35 mm 和 0.51 mm 的 LCE 中空纤维(图 6(b))。

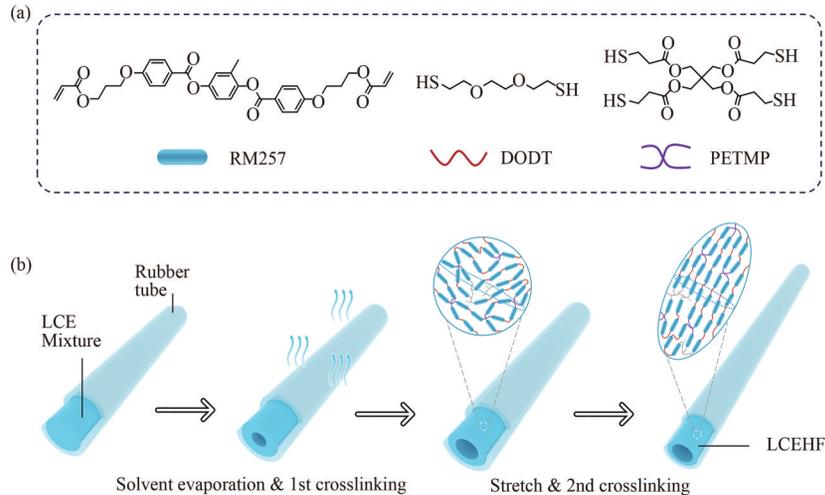


图 6 (a)RM257 作为液晶基元、DODT 作为间隔剂、PETMP 作为交联剂的化学结构;(b)溶剂蒸发辅助模板法制备 LCE 中空纤维的流程示意图^[60]。

Fig. 6 (a) Chemical structure of RM257 as mesogen, DODT as spacer and PETMP as crosslinker; (b) Schematic diagram of preparing LCE hollow fibers by solvent evaporation-assisted template method^[60].

为明确纤维形成中空结构的机理,该团队对 LCE 中空纤维成型过程进行了研究。当使用 PTFE 管作为模板时,由于小分子无法溶胀 PTFE 材质,因此 LCE 体系中乙酸乙酯一直保留在管道中,并形成与模板内径匹配的实心圆柱,形成交联网络。相反,当使用硅胶管作为模板时,由于硅胶内高分子链的间隙较大,乙酸乙酯能够溶胀硅胶模板并透过管壁挥发,最终形成贴附于硅胶管内壁的 LCE 膜。如图 7 所示,通过显微镜检测成型过程发现,管内随乙酸乙酯的挥发会形成多个气核并逐渐成长为气泡,气泡随着蒸发的进行将继续沿硅胶管的长轴扩散形成连续的气路,最终形成 LCE 中空纤维。

通过对该 LCE 柔性气动驱动器的气动性能进行研究,该团队同样发现了前文介绍的反常力学行为:当腔内外气压差 ΔP 小于 340 kPa 时,该驱动器几乎不变形,当 ΔP 达到 340 kPa 时,驱动器突然发生形变,并体现为轴向收缩与径向膨胀,随后在 340~350 kPa 时驱动器体积基本保持恒定,并在 350~420 kPa 时进一步地发生轻微的轴向伸长和径向膨胀。该团队将这种反常力学行为归因于 LCE 内部的液晶基元旋转的临界应力和软弹性平台区,与上文对反常力学行为

的机理阐释相同。此外,LCE 的热刺激响应同样能够导致液晶基元的旋转,因此该团队通过结合热致相变和力致液晶基元转动的响应机制,成功实现了临界气压的降低并显著提高了驱动性能。



图 7 气泡在 LCE 混合溶液中形成并扩散^[61]

Fig. 7 Formation and diffusion of a gas bubble pathway in the LCE mixture^[61]

在热刺激作用下,驱动器可产生约 42% 的轴向收缩。在气压刺激下,驱动器的最大收缩率约为 27%。而在热和气双重刺激下,驱动器可产生约 50% 的轴向收缩,大于单一热刺激或气压刺激。这主要归因于热致相变和力致液晶基元转动的热-气动增强效应。利用该驱动器优异的驱动性能,该团队在热-气动增强下实现了人工手臂快速的、可逆肘部弯曲(图 8(a,b)),展示了驱动器在人工肌肉中的应用潜力。实验数据表明,热-气动增强下 LCE 柔性气动驱动器的响应速度与回复速度相较于气动驱

动分别提高了 300 倍和 3 700 倍(图 8(c)),证明了热-气动增强策略在加速动力学响应方面的显著优势。

因此,通过热-气动增强的 LCE 柔性气动驱

动器能够突破传统气动驱动技术面临的响应与回复迟缓的瓶颈,为 LCE 柔性气动驱动器的发展提出了新驱动机制。

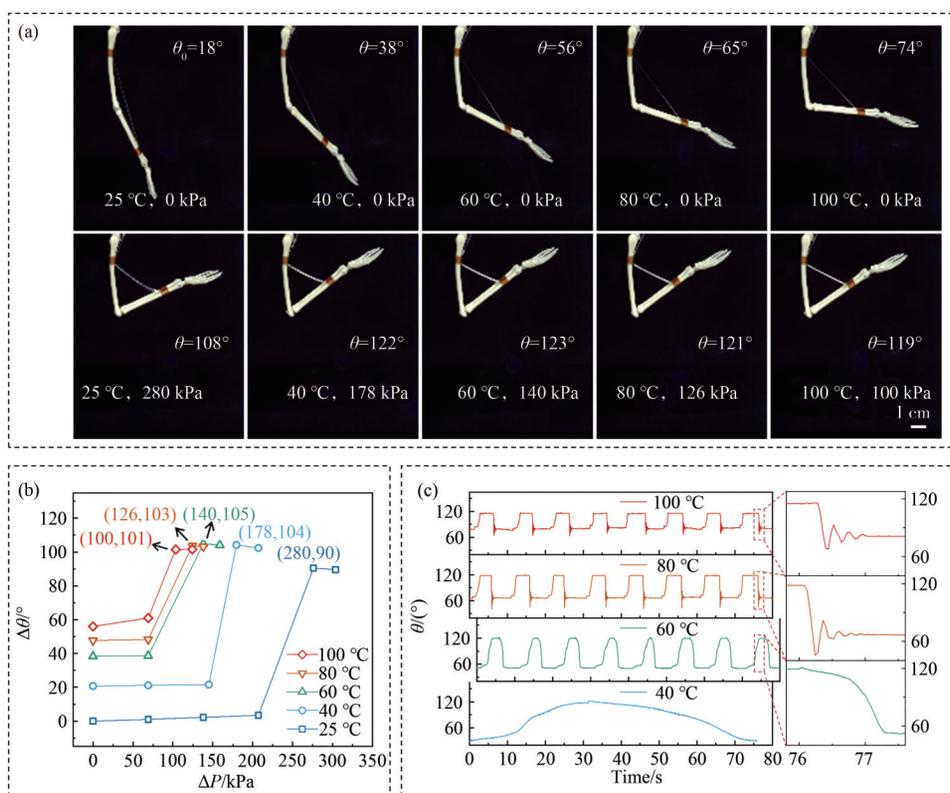


图 8 (a)LCE 柔性气动驱动器在不同温度和气压下弯曲人工臂的照片^[61]; (b)纤维状 LCE 柔性气动驱动器组成的人工臂在不同气压、温度条件下的弯曲角度变化曲线^[61]。纵轴为人工臂弯曲角度变化量,横轴为气腔内外气压差,不同颜色的曲线代表不同的温度条件; (c)当 LCE 柔性气动驱动器在不同温度下气动驱动时,人工臂弯曲角度随时间的变化^[61]。放大的图像分别显示了在 60 °C、80 °C 和 100 °C 下人工臂弯曲角度随时间的变化。

Fig. 8 (a) Photograph of an artificial arm bent by a LCE soft pneumatic actuator at different temperatures and air pressures^[61]; (b) Bending angle curves of an artificial arm composed of LCE soft pneumatic actuators under different air pressures and temperatures^[61], the longitudinal axis is the change in the bending angle of the artificial arm, the horizontal axis is the air pressure difference between the inside and outside of the chamber, and the curves of different colors represent different temperature conditions; (c) Changes in the bending angle of the artificial arm over time when the fibrous LCE soft pneumatic actuator is pneumatically actuated at different temperatures^[61]. The enlarged images show the bending angle of the artificial arm overtime at 60 °C, 80 °C, and 100 °C, respectively.

3.3 光学器件的研究与应用

LCE 柔性气动驱动器除了丰富的力学应用,还展现出在光学领域的显著应用潜力。胆甾相 LCE (Cholesteric Liquid Crystal Elastomer, CLCE) 具有周期性螺旋分子排列,能够选择性地反射圆偏振光,因此具有出色的光调制能力。通过施加外力能够改变 CLCE 的螺旋间距长度,从而导致宽带波长范围内的颜色变化。因此,一种可行的

策略是通过复合 CLCE 与弹性体气室构建液晶弹性体柔性气动驱动器,通过气动驱动诱导宽光谱偏移着色,实现光学显示与光学伪装等应用。

基于以上思路,2021 年,美国宾夕法尼亚大学的 Shu Yang 课题组设计并制备了一种具有气动宽光谱偏移的像素化结构着色的薄膜状 CLCE 复合材料(图 9)^[62]。该材料的着色单元为双层结构,底层为用于充气的嵌入空气通道

的聚二甲基硅氧烷 (Poly (dimethylsiloxane), PDMS) 并提供支撑 (300~500 μm 厚), 上层为

主链型 CLCE (Main-Chain CLCE, MCLCE) 薄膜 (厚度 < 15 μm)。

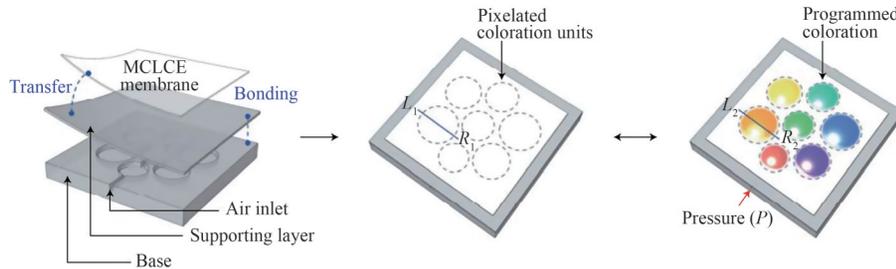


图 9 像素化结构着色平台的示意图,由带有空气通道的 PDMS 底座和 MCLCE 膜组成,该膜能在压力驱动下发生可逆气动驱动^[62]。

Fig. 9 Schematic diagram of a pixelated structural coloring platform consisting of a PDMS base with an air channel and an MCLCE membrane that is reversibly pneumatically actuated after inflation and deflation^[62]

随后,该研究团队巧妙利用了材料的高弹性以及大泊松比特性,通过精细编程气动尺寸与结构布局,动态调整螺旋间距长度,成功实现了宽光谱偏移下的像素化结构着色。利用该材料独特的机械变色性能与像素和空气通道布局的大自由度,展示了其在光学显示(图 10(a))以及光学伪装(图 10(b))方面的应用。

尽管该工作验证了 LCE 柔性气动驱动器在光学领域的应用潜力,然而依旧遗留以下问题:该材料实际上是将光学显示部分(MCLCE膜)和柔性气动部分(带有空气通道的 PDMS 底座)复合而成,未能实现单一组分同时实现柔性气动驱动与光学显示,因此存在界面粘接、工艺复杂等问题。因此,柔性气动部分与光学显示部分的集成化有待进一步研究。

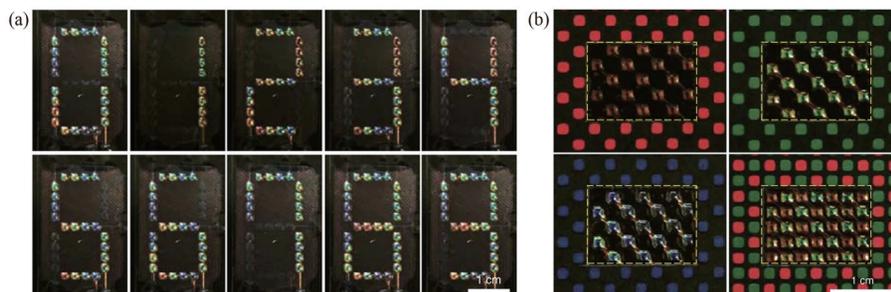


图 10 (a) 光学显示应用展示^[62],该构件由 7 个空气通道和 28 个相同的小型着色单元制造,其中每 4 个着色单元连接到一个空气通道;(b) 光学伪装应用演示^[62],该材料通过像素化结构着色以匹配带有不同颜色点的背景。

Fig. 10 (a) Optical display application demonstration^[62], the building consists of 7 air channels and 28 identical small coloring units manufactured, where every 4 coloring units are connected to an air channel; (b) Demonstration of the optical camouflage application^[62], the material is colored to match the background with different color dots.

4 总结与展望

本文深入探讨了 LCE 柔性气动驱动器的独特力学行为及其在实际应用中的潜力。相比传统柔性气动驱动器,LCE 柔性气动驱动器由于液晶基元的旋转与聚合物网络变形的耦合而体现出反常力学行为。

科研工作者为推进 LCE 柔性气动驱动器的发展进行了一系列创新性研究:(1)为了实现多驱动模式以符合实际需求,科研人员通过旋转 3D 打印技术实现了对液晶基元取向的精准控制,从而开发出具有可编程驱动模式的 LCE 柔性气动驱动器。这些驱动器能够根据预设的取向进行收缩、伸长和扭转等多种气动

行为,展示了在软体机器人、气动人工肌肉等领域的广阔应用前景。(2)针对 LCE 柔性气动驱动器气动响应和回复慢的问题,研究者提出了热-气动双驱动机制,显著提升了驱动器的响应速度与性能。实验证明,热-气动增强下的 LCE 柔性气动驱动器在人工肌肉应用中表现出快速且可逆的变形能力,为 LCE 柔性气动驱动器在高性能驱动器领域的实际应用提供了有力支持。(3)为了拓宽 LCE 柔性气动驱动器的应用范围,研究者探索了 LCE 柔性驱动器的光学应用,利用其大泊松比与高弹性实现了像素化宽光谱偏移显示。

尽管科研工作者已经取得一系列创新成果,然而目前 LCE 柔性气动驱动器仍处于起步阶段,为实现其实际应用还需做以下改进:(1)基于旋转 3D 打印技术,继续改进制备方式以构筑更复

杂的驱动模式驱动更复杂三维结构的驱动器。(2)基于热-气动双驱动机制为代表的多刺激增强机制,探索气动驱动与光、电、磁场等其他刺激的结合,进一步优化 LCE 柔性气动驱动器的响应速度与回复速度。此外,将研制的纤维状 LCE 柔性气动驱动器用作构筑单元,组装成复杂的结构以实现更精确和复杂的驱动模式,有望进一步拓宽其在人造肌肉、软机器人和多功能织物中的应用。(3)基于 CLCE 的力致变色特性,进行柔性气动部分与光学显示部分的集成化研究,拓宽其光学应用潜力。

总之,LCE 柔性气动驱动器以其独特的力学行为和广阔的应用前景,正成为柔性气动驱动器领域的研究热点。未来,随着技术的不断发展和创新,LCE 柔性气动驱动器将在力学领域和光学领域的实际应用中发挥重要作用。

参 考 文 献:

- [1] WARNER M, TERENTJEV E M. *Liquid Crystal Elastomers* [M]. Oxford: Clarendon Press, 2003.
- [2] HU J, NIE Z Z, WANG M, *et al.* Springtail-inspired light-driven soft jumping robots based on liquid crystal elastomers with monolithic three-leaf panel fold structure [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(9): e202218227.
- [3] SUN J H, WANG Y P, LIAO W, *et al.* Ultrafast, high-contractile electrothermal-driven liquid crystal elastomer fibers towards artificial muscles [J]. *Small*, 2021, 17(44): 2103700.
- [4] WANG Y P, LIAO W, SUN J H, *et al.* Bioinspired construction of artificial cardiac muscles based on liquid crystal elastomer fibers [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2022, 7(1): 2100934.
- [5] ZHANG M C, PAL A, LYU X, *et al.* Artificial-goosebump-driven microactuation [J]. *Nat. Mater.*, 2024, 23(4): 560-569.
- [6] SILVA P E S, LIN X Y, VAARA M, *et al.* Active textile fabrics from weaving liquid crystalline elastomer filaments [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(14): 2210689.
- [7] SUN J H, LIAO W, YANG Z Q. Additive manufacturing of liquid crystal elastomer actuators based on knitting technology [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(36): 2302706.
- [8] MARTINEZ A P, NG A, NAH S H, *et al.* Active-textile yarns and embroidery enabled by wet-spun liquid crystalline elastomer filaments [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(34): 2400742.
- [9] KÜPFER J, FINKELMANN H. Nematic liquid single-crystal elastomers [J]. *Makromol. Chem., Rapid Commun.*, 1991, 12(12): 717-726.
- [10] OHZONO T, SAED M O, TERENTJEV E M. Enhanced dynamic adhesion in nematic liquid crystal elastomers [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(30): 1902642.
- [11] KOTIKIAN A, WATKINS A A, BORDIGA G, *et al.* Liquid crystal elastomer lattices with thermally programmable deformation via multi-material 3D printing [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(34): 2310743.
- [12] ESCOBAR M C, WHITE T J. Fast and slow-twitch actuation via twisted liquid crystal elastomer fibers [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(34): 2401140.
- [13] GARCIA-AMORÓS J, MARTÍNEZ M, FINKELMANN H, *et al.* Photoactuation and thermal isomerisation mechanism of cyanoazobenzene-based liquid crystal elastomers [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, 16(18): 8448-8454.

- [14] OSCURATO S L, SALVATORE M, MADDALENA P, *et al.* From nanoscopic to macroscopic photo-driven motion in azobenzene-containing materials [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(8): 1387-1422.
- [15] TIAN H M, WANG Z J, CHEN Y L, *et al.* Polydopamine-coated main-chain liquid crystal elastomer as optically driven artificial muscle [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(9): 8307-8316.
- [16] LIU Z, LIAO J Q, HE L F, *et al.* Preparation, photo-induced deformation behavior and application of hydrogen-bonded crosslinked liquid crystalline elastomers based on α -cyanostilbene [J]. *Polym. Chem.*, 2020, 11(37): 6047-6055.
- [17] YANG L Q, SETYOWATI K, LI A, *et al.* Reversible infrared actuation of carbon nanotube-liquid crystalline elastomer nanocomposites [J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(12): 2271-2275.
- [18] JI Y, HUANG Y Y, RUNGSAWANG R, *et al.* Dispersion and alignment of carbon nanotubes in liquid crystalline polymers and elastomers [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(31): 3436-3440.
- [19] LIU X Y, WEI R B, HOANG P T, *et al.* Reversible and rapid laser actuation of liquid crystalline elastomer micropillars with inclusion of gold nanoparticles [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2015, 25(20): 3022-3032.
- [20] WANG Y C, DANG A L, ZHANG Z F, *et al.* Repeatable and reprogrammable shape morphing from photoresponsive gold nanorod/liquid crystal elastomers [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(46): 2004270.
- [21] GUO Y L, LIU N, CAO Q, *et al.* Photothermal diol for NIR-responsive liquid crystal elastomers [J]. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2022, 4(8): 6202-6210.
- [22] ZHANG W, NAN Y F, WU Z X, *et al.* Photothermal-driven liquid crystal elastomers: materials, alignment and applications [J]. *Molecules*, 2022, 27(14): 4330.
- [23] LEI B, WANG H K, WU K H, *et al.* Light-driven folding liquid crystal elastomer catapult with improved morphing velocity [J]. *Adv. Intell. Syst.*, 2023, 5(3): 2200360.
- [24] 郭瑞彩,林勇,高文慧,等. 氧化石墨烯/液晶弹性体复合膜的性能研究[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(2): 149-159.
- GUO R C, LIN Y, GAO W H, *et al.* Properties of graphene oxide/liquid crystal elastomer composites [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2023, 38(2): 149-159. (in Chinese)
- [25] XU S H, HAO Z X, CHEN X D, *et al.* Viscoelastic dynamics of photothermal-responsive liquid crystal elastomer fibers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(19): 2311425.
- [26] COURTY S, MINE J, TAJBAKHSH A R, *et al.* Nematic elastomers with aligned carbon nanotubes: new electromechanical actuators [J]. *Europhys. Lett.*, 2003, 64(5): 654-660.
- [27] FORD M J, AMBULO C P, KENT T A, *et al.* A multifunctional shape-morphing elastomer with liquid metal inclusions [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2019, 116(43): 21438-21444.
- [28] KENT T A, FORD M J, MARKVICKA E J, *et al.* Soft actuators using liquid crystal elastomers with encapsulated liquid metal joule heaters [J]. *Multifunct. Mater.*, 2020, 3(2): 025003.
- [29] LIANG X, HU B. Electrothermally-induced controllable self-actuated oscillation in liquid crystal elastomer mechanical metamaterials under steady-state circuits [J]. *Arch. Appl. Mech.*, 2024, 95: 5.
- [30] 王发欣,张欢,陈原浩,等. 4D打印可编程液态金属-液晶弹性体软体致动器[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(3): 257-265.
- WANG F X, ZHANG H, CHEN Y H, *et al.* 4D printed programmable deformable liquid metal-liquid crystal elastomer soft actuator [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2024, 39(3): 257-265. (in Chinese)
- [31] ZHANG X H, LIAO W, ZHU C Y, *et al.* *In situ* programmable electrothermal actuation of liquid crystal elastomer fibers assisted by microfluidics [J]. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2024, 6(17): 11050-11056.
- [32] XU L, ZHU C, LAMONT S, *et al.* Programming motion into materials using electricity-driven liquid crystal elastomer actuators [J]. *Soft Robot.*, 2024, 11(3): 464-472.
- [33] BOOTHBY J M, KIM H, WARE T H. Shape changes in chemoresponsive liquid crystal elastomers [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2017, 240: 511-518.
- [34] KIM K, GUO Y H, BAE J, *et al.* 4D printing of hygroscopic liquid crystal elastomer actuators [J]. *Small*, 2021, 17(23): 2100910.
- [35] ZHANG Y Y, SUN T, JIA Y C, *et al.* Soft robotic finger based on double-layer liquid-crystal elastomer with built-

- in grid structure pressure sensor [J]. *IEEE Sens. J.*, 2024, 24(8): 12178-12185.
- [36] DAVIDSON Z S, SHAHSAVAN H, AGHAKHANI A, *et al.* Monolithic shape-programmable dielectric liquid crystal elastomer actuators [J]. *Sci. Adv.*, 2019, 5(11): eaay0855.
- [37] ANNAPOORANAN R, WANG Y, CAI S Q. Harnessing soft elasticity of liquid crystal elastomers to achieve low voltage driven actuation [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2023, 8(9): 2201969.
- [38] ZHANG C C, CHEN G C, ZHANG K H, *et al.* Repeatedly programmable liquid crystal dielectric elastomer with multimodal actuation [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(16): 2313078.
- [39] CHEN S Y, ZHAO Z H, LI C H, *et al.* Responsive materials based on coordination bonds [J]. *Responsive Mater.*, 2023, 1(2): e20230011.
- [40] 范扬扬, 吕久安. 响应形变液晶高分子的取向方法和功能开发[J]. 液晶与显示, 2023, 38(1): 60-76.
FAN Y Y, LÜ J A. Alignment methods and function development of deformable liquid crystal polymers [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2023, 38(1): 60-76. (in Chinese)
- [41] ZHANG Y X, ZHENG Z G, LI Q. Multiple degrees-of-freedom programmable soft-matter-photonics: configuration, manipulation, and advanced applications [J]. *Responsive Mater.*, 2024, 2(1): e20230029.
- [42] ZHENG R, WEI Y, ZHANG Z C, *et al.* Stimuli-responsive active materials for dynamic control of light field [J]. *Responsive Mater.*, 2023, 1(2): e20230017.
- [43] LIU M Z, JIN L S, YANG S S, *et al.* Shape morphing directed by spatially encoded, dually responsive liquid crystalline elastomer micro-actuators [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(5): 2208613.
- [44] JONES T J, JAMBON-PUILLET E, MARTHELOT J, *et al.* Bubble casting soft robotics [J]. *Nature*, 2021, 599(7884): 229-233.
- [45] DAERDEN F, LEFEBER D. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation [J]. *Eur. J. Mech. Environ. Eng.*, 2002, 47(1): 11-21.
- [46] WANG T Y, GE L S, GU G Y. Programmable design of soft pneu-net actuators with oblique chambers can generate coupled bending and twisting motions [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2018, 271: 131-138.
- [47] ZAGHLOUL A, BONE G M. 3D shrinking for rapid fabrication of origami-inspired semi-soft pneumatic actuators [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 191330-191340.
- [48] XIAO W, DU X N, CHEN W X, *et al.* Cooperative collapse of helical structure enables the actuation of twisting pneumatic artificial muscle [J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 2021, 201: 106483.
- [49] ZHONG G L, DOU W Q, ZHANG X C, *et al.* Bending analysis and contact force modeling of soft pneumatic actuators with pleated structures [J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 2021, 193: 106150.
- [50] FENG M, YANG D Z, REN L, *et al.* X-crossing pneumatic artificial muscles [J]. *Sci. Adv.*, 2023, 9(38): eadi7133.
- [51] GUO B Z, WANG P D, ZHAO Z A, *et al.* Design and experiments of an origami-inspired pneumatic flexible manipulator [J]. *Acta Mech. Solida Sin.*, 2023, 36(2): 254-261.
- [52] CHEN H Y, MA Y Y, CHEN W D. Design and optimization of an origami-inspired foldable pneumatic actuator [J]. *IEEE Robot. Automation Lett.*, 2024, 9(2): 1278-1285.
- [53] STANNARIUS R, SCHÜRING H, TOLKSDORF C, *et al.* Elastic properties of liquid crystal elastomer balloons [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol. Sec. A: Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2001, 364(1): 305-312.
- [54] GIUDICI A, BIGGINS J S. Giant deformations and soft-inflation in LCE balloons [J]. *Europhys. Lett.*, 2020, 132(3): 36001.
- [55] CHATER E, HUTCHINSON J W. On the propagation of bulges and buckles [J]. *J. Appl. Mech.*, 1984, 51(2): 269-277.
- [56] LEE V, BHATTACHARYA K. Actuation of cylindrical nematic elastomer balloons [J]. *J. Appl. Phys.*, 2021, 129(11): 114701.
- [57] HE Q G, ZHENG Y, WANG Z J, *et al.* Anomalous inflation of a nematic balloon [J]. *J. Mech. Phys. Solids*, 2020, 142: 104013.
- [58] HERBERT K M, FOWLER H E, MCCRACKEN J M, *et al.* Synthesis and alignment of liquid crystalline

- elastomers [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2021, 7(1): 23-38.
- [59] LIAO W, YANG Z Q. 3D printing programmable liquid crystal elastomer soft pneumatic actuators [J]. *Mater. Horiz.*, 2023, 10(2): 576-584.
- [60] OHZONO T, KATOH K, MINAMIKAWA H, *et al.* Internal constraints and arrested relaxation in main-chain nematic elastomers [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 787.
- [61] MA J Z, WANG Y P, SUN J H, *et al.* Liquid crystal elastomer hollow fibers as artificial muscles with large and rapid actuation enabled by thermal-pneumatic enhanced effect [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(37): 2402403.
- [62] KIM S U, LEE Y J, LIU J Q, *et al.* Broadband and pixelated camouflage in inflating chiral nematic liquid crystalline elastomers [J]. *Nat. Mater.*, 2022, 21(1): 41-46.

作者简介:



廖 威,男,博士,工程师,2022年于清华大学获得博士学位,主要从事航空发动机用陶瓷纤维复合材料和构件的研制工作。E-mail: liaow14@tsinghua.org.cn



马佳哲,女,博士研究生,2023年于天津大学获得硕士学位,主要从事液晶弹性体材料的开发及其在驱动器和传感器等领域的应用研究。E-mail: mjz23@mails.tsinghua.edu.cn



陈植冰,男,博士研究生,2024年于暨南大学获得学士学位,主要从事液晶弹性体材料的研究。E-mail: chenzb24@mails.tsinghua.edu.cn



杨忠强,女,博士,副教授,2007年于剑桥大学获得博士学位,主要从事液晶材料的成型加工及其在驱动器、人工肌肉和柔性机器人等领域的应用研究。E-mail: zyang@tsinghua.edu.cn