

光驱动液晶聚合物振动器研究进展

王建闯, 王文忠, 于海峰

引用本文:

王建闯,王文忠,于海峰. 光驱动液晶聚合物振动器研究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 37(2): 186–198.

WANG Jian-chuang, WANG Wen-zhong, YU Hai-feng. Research progress in light-driven oscillators of liquid-crystalline polymers[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(2): 186–198.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0253>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降低聚合物稳定蓝相液晶显示器驱动电压的一种方法

A method to reduce the operating voltage of polymerstabilized blue-phase liquid crystal displays

液晶与显示. 2017, 32(3): 163–168 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173203.0163>

聚合物稳定蓝相液晶器件的模拟计算模型

Simulation model of polymer stabilized blue-phase liquid crystal devices

液晶与显示. 2021, 36(12): 1614–1622 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0235>

半导体量子棒的光控取向技术进展

Progress in photo-induced semiconductor quantum rods alignment

液晶与显示. 2020, 35(5): 409–421 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203505.0409>

基于聚合物稳定液晶的智能调光膜研究进展

Research progress of smart windows based on polymer stabilized liquid crystals

液晶与显示. 2021, 36(9): 1225–1238 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0101>

纳米颗粒掺杂的聚合物稳定液晶微管随机激光器性能研究

Properties of random laser based on polymer stabilized liquid crystal doped with nanoparticles

液晶与显示. 2018, 33(1): 14–22 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183301.0014>

文章编号:1007-2780(2022)02-0186-13

光驱动液晶聚合物振动器研究进展

王建闯, 王文忠, 于海峰*

(北京大学 材料科学与工程学院, 北京 100871)

摘要:光响应液晶聚合物在光化学(如偶氮苯)或者光热(如氧化石墨烯)作用下发生有序-无序转变,进而产生宏观形变,是一类被广泛研究的智能材料。目前光驱动液晶聚合物振动器的实现主要有两种途径:一是紫外或者可见光连续照射时,偶氮苯液晶聚合物的力学特性发生非线性变化,驱动器呈现无规振动;二是通过构筑非平衡系统,利用驱动器运动过程中的自遮挡效应,在光源连续照射下自发地产生周期性、连续性运动,可用于光学信号调制、移动机器人、能量转换、轧机、马达等。本文综述了光驱动液晶聚合物振动器领域的研究进展,详细介绍了其设计原理、运动机理以及应用领域,对未来的发展趋势做出了展望。

关键词:液晶聚合物;光化学作用;光热作用;振动器

中图分类号:O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0253

Research progress in light-driven oscillators of liquid-crystalline polymers

WANG Jian-chuang, WANG Wen-zhong, YU Hai-feng*

(School of Materials Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Photo-responsive liquid-crystalline polymers (LCPs) containing photoisomerizable molecular switches (such as azobenzene, AZ) or photothermal agents (such as graphene), are a type of widely investigated smart materials, which can undergo an order-disorder transition, inducing a macroscopic shape change. Presently, light-driven oscillators of LCPs have been achieved mainly by two methods. One is that the actuator displays chaotic swing for the nonlinear change of mechanical properties of LCPs containing AZs under continuous UV or visible light illumination. The other is constructing nonequilibrium systems and relying on the self-shadowing effect during motion. The actuator can realize periodical and sustained motion without additional manual control components, which can be extensively exploited in light signal modulation, mobile robots, energy harvesting, mills, motors, etc. This paper reviews the research progress of light-driven oscillators of LCPs in the past few years, and also introduces its fabrication methods, motion mechanisms and application areas in details. Finally, it provides a view of prospective of its future development trend for light-driven oscillators of LCPs.

Key words: liquid-crystalline polymer; photochemical effect; photothermal effect; oscillator

收稿日期:2021-10-09;修订日期:2021-11-01.

基金项目:国家自然科学基金(No.51773002)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51773002)

* 通信联系人, E-mail: yuhaifeng@pku.edu.cn

1 引言

近年来,柔性驱动器因其具有高度柔顺性,在精密任务以及非结构化环境中有着潜在应用价值,受到越来越多的关注^[1-4]。基于形状记忆聚合物^[5]、电活性聚合物^[6-7]、液晶聚合物^[8-11]、复合材料^[12]以及水凝胶^[13-14]的柔性驱动器逐渐被开发出来,它们不仅可以完成收缩、膨胀、弯曲、折叠、扭曲、跳跃等运动方式,还可以模拟人眼虹膜的自我调节、植物开花/闭合、捕蝇草捕食等具有反馈机制的运动行为。

然而,现有的柔性驱动器主要关注平衡态或者亚稳态结构/状态的产生,结构/状态的切换需要调整外界刺激^[15]。只有少量的研究关注到非平衡态条件下的自循环运动,特别是自振动行为。振动是物体在受到非周期激励时,发生的连续性、周期性运动行为^[16-17],本身具有能量和信息(振幅、频率和相位),是自然界中一种比较常见的现象,如地震、海水波动、树叶摆动,甚至人类的心跳等。此外,人造振动器,如钟表、乐器、发动机、心脏起搏器等,在当今人类社会发展中起着重要作用。

自振动柔性驱动器具有许多独特的优势:一是直接从环境中收集能量,并在无需额外增加控制部件的情况下实现周期性运动;二是降低系统的复杂性;三是便携性^[12,18]。近年来,研究人员已经用智能响应材料构建了多种自振动系统,有助于我们理解非平衡态热力学过程,并拓宽其应用范围^[19-24]。多数研究是将经典的 Belousov-Zhabotinsky 周期振荡反应引入水凝胶材料中,在周期化学反应条件下,凝胶材料表现出周期性的体积膨胀/收缩,将化学能耗散掉^[14,25]。这种凝胶材料可用于制备仿纤毛运动驱动器^[26]、仿行走运动驱动器^[19]、仿蠕动运动驱动器^[27]等,但这些驱动器需要在液体环境中工作,限制了其应用领域。作为一类重要的智能响应材料,液晶因其独特的物化性质受到广大研究人员的密切关注。液晶态是物质的一种特殊状态,它介于液体和晶体之间,既保留了晶体一些特性,比如有序性、各向异性,同时又具有液体的流动性^[28]。液晶高分子,特别是交联液晶聚合物,同时保留了液晶的各向异性和高分子的熵弹性,在光^[29-32]、电^[33]、

热^[34]、磁^[35]等刺激下可以完成行走^[19]、爬行^[36]、滚动^[37]、抓取^[38]、跳跃^[39]等运动模式,是一类广泛研究的智能材料。与其他外界刺激相比,光具有无污染、远程、非接触、精确调控等优点^[40-42]。因此,各种基于光热作用或光化学作用的液晶聚合物振动器被制备出来,并将其用于软体机器人^[34]、能源利用^[43]、信号调控^[44]等领域。

本文从光驱动液晶聚合物振动器的制备方法、工作原理以及应用领域出发,总结了近年来国内外研究人员在该领域取得的研究进展。最后,对光驱动液晶聚合物振动器的发展趋势做了一定的展望。

2 光驱动液晶聚合物振动器

根据光能转化途径,可以分为光化学作用液晶聚合物振动器和光热作用液晶聚合物振动器。

2.1 光化学作用液晶聚合物振动器

如图 1(a)所示,偶氮苯及其衍生物具有反式(*trans*)结构和顺式(*cis*)结构两种异构体,紫外光照射时可以由 *trans* 态转变为 *cis* 态;可见光照射,或者热处理可以使偶氮苯分子由 *cis* 态回复为 *trans* 态^[2,45]。因其反式结构和顺式结构的分子尺寸变化较大,偶氮苯及其衍生物是一类广泛研究的光驱动材料。

2.1.1 光驱动液晶聚合物无规振动器

如图 1(b)所示,*trans* 态偶氮苯分子为长棒状结构,与整个体系的分子形状类似,对液晶相有稳定作用;相反,不规则形状的 *cis* 态偶氮苯分子与体系不兼容,造成体系紊乱,降低了体系的有序度,破坏了液晶相,使薄膜发生宏观形变;可见光照射后又回复为初始状态^[9]。

大多数偶氮苯液晶聚合物驱动器需要用紫外光驱动,而紫外光对生物体一般是有害的,同时还会影响驱动器的使用寿命。因此, Schenning 等人^[23]合成了吸收峰在可见光区域的氟取代偶氮苯衍生物(F-azo)。研究发现含有 F-azo 的液晶网络聚合物(LCN)在太阳光照射下表现出无规振动行为。用 405 nm 或者 530 nm 光源单独照射时,没有观察到该现象,只有用 405 nm 和 530 nm 波长的光源同时照射薄膜时才会发生无规振动。530 nm 光源照射时,薄膜的储能模量由 1 450 MPa 降低到 1 250 MPa;405 nm 光源照射

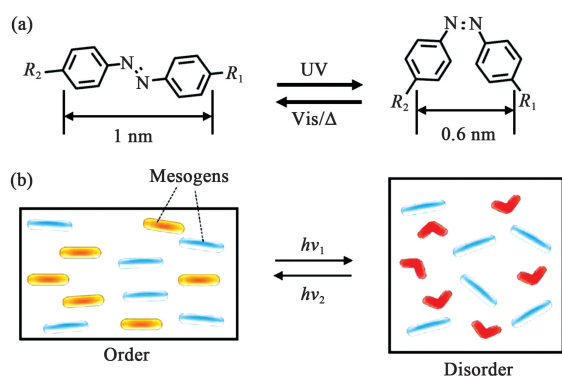


图 1 (a)偶氮苯的光致异构化转变;(b)光化学作用诱导液晶聚合物有序-无序转变^[10]。

Fig.1 (a) Photo-isomerization of azobenzene; (b) Photochemical-induced order-disorder phase transition of LCPs. Reproduced with permission^[10]. Copyright 2019, Wiley-VCH.

时,薄膜的储能模量降低到 700 MPa;而 405 nm 和 530 nm 光源同时照射时,薄膜的储能模量可以降低到 300 MPa,此时薄膜的表面温度为 44 ℃,在此温度下(无 405 nm 和 530 nm 光源照射)薄膜的弹性模量依然在 1 GPa 以上。他们认为在 405 nm 和 530 nm 光源同时照射时,偶氮苯分子发生 *trans-cis-trans* 动态异构化过程,薄膜的弹性模量降低,发生光致变软现象,这可能是薄膜发生无规振动的原因。

由于制备大面积单畴取向的光致形变高分子薄膜较为复杂,北京大学于海峰课题组将偶氮苯液晶聚合物溶液滴涂在 Kapton[®] 薄膜上,待溶剂挥发干燥后在液晶温度区间退火,制备了偶氮苯液晶聚合物无规取向的双层复合膜(图 2 (a))^[46-48]。如图 2(b)和 2(c)所示,紫外光照时,偶氮苯分子由 *trans* 态转变为 *cis* 态,偶氮苯液晶聚合物层发生光致体积膨胀,双层膜朝 Kapton[®] 一侧弯曲。如图 3(a)和 3(b)所示,UV 光源连续照射时,双层膜达到最大弯曲角度后会向初始位置方向回复一定角度,然后再次向前运动达到最大弯曲角度,表现为无规振动。无规振动是一种复杂的运动行为,这里给出一个可能的机理对其运动过程进行解释说明。如图 3(c)所示,UV 光源照射双层膜时,偶氮苯液晶聚合物层发生光致体积膨胀,驱动薄膜向前运动,聚合物层产生的驱动力大于运动过程中受到的阻力,阻力随弯曲角度的增加而变大;由于惯性,薄膜越过平衡位置

(驱动力等于阻力);当薄膜运动到最大弯曲角度时,阻力大于驱动力,薄膜开始向初始位置方向运动;由于惯性,薄膜越过平衡位置;当薄膜停止向

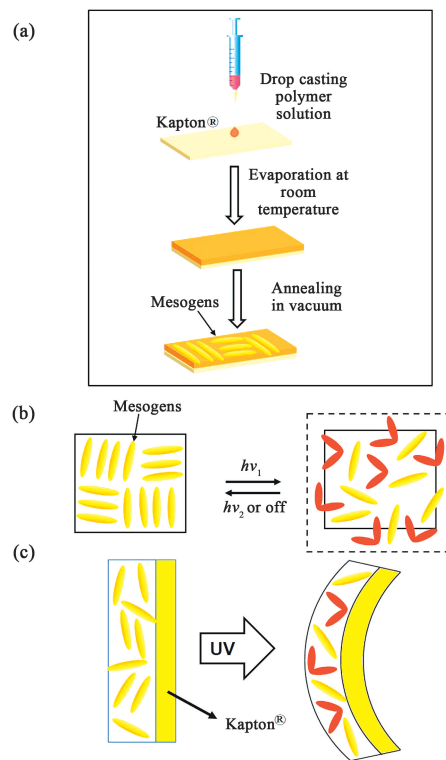
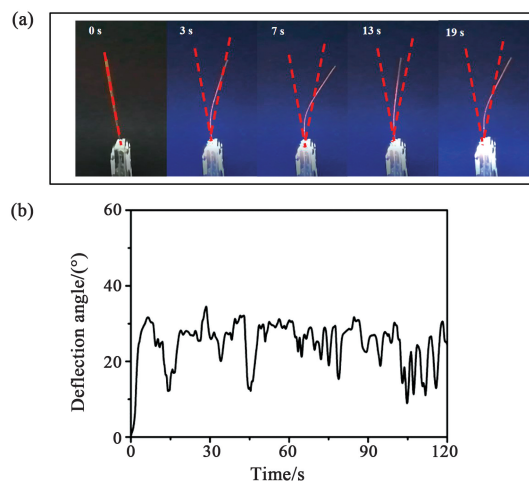


图 2 (a)双层膜制备过程示意图;(b)光致体积膨胀机理示意图^[46]; (c)紫外光照时双层膜朝 Kapton[®] 一侧弯曲。

Fig.2 (a) Fabrication process of the bilayer film; (b) Mechanism of photo-induced volume change in polymer containing azobenzene; (a), (b) Reproduced with permission^[46]. Copyright 2021, American Chemical Society; (c) Bilayer film bends towards the Kapton[®] layer under UV light illumination.



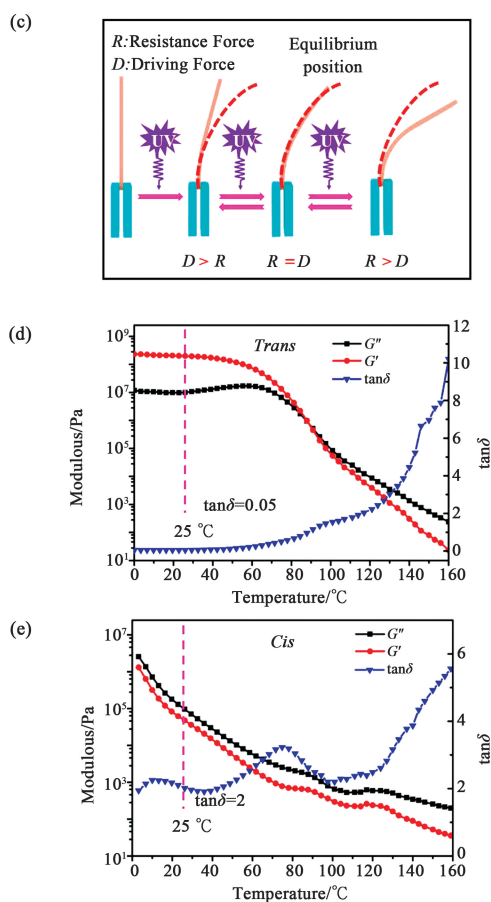


图3 (a) 双层膜在 UV 光源连续照射过程中的照片; (b) 双层膜在 UV 光源连续照射时的弯曲角度随时间变化曲线; (c) 双层膜在 UV 光源连续照射时的无规振动示意图; (d) *Trans* 态偶氮苯聚物流变性质随温度变化曲线; (e) *Cis* 态偶氮苯聚物流变性质随温度变化曲线^[46]。

Fig.3 (a) Pictures of the bilayer film under continuous UV light illumination; (b) Curves for deflection angle with time of the bilayer film under continuous UV light illumination; (c) Schematic of chaotic-oscillating behavior of the bilayer film under continuous UV light illumination; (d) Curves for the rheology properties of *trans* AZ polymer with different temperatures; (e) Curves for the rheology properties of *cis* AZ polymer with different temperatures. Reproduced with permission^[46]. Copyright 2021, American Chemical Society.

初始位置方向运动,此时驱动力大于阻力,薄膜改变运动方向,重新向前运动。在 UV 光源连续照射条件下,薄膜反复地向前/向初始位置方向运

动,呈现出振动行为。如图 3(d)和 3(e)所示,在室温条件下,*cis* 态偶氮苯聚合物的损耗因子大于 2,表明它的黏性大于弹性;而 *trans* 态偶氮苯聚合物在室温下的损耗因子小于 0.5,表明它的弹性大于黏性,据此推测 UV 光源连续照射时,偶氮苯聚合物变软,它的力学特性发生了一些非线性变化,这可能是双层膜在 UV 光源连续照射下呈现无规振动的原因。

2.1.2 光驱动液晶聚合物周期振荡器

由于偶氮苯分子 *trans* 态跃迁矩与分子长轴平行,当分子长轴与线偏振光平行时,吸收能量,进入激发态,发生 *trans-cis* 转变;当分子长轴与线偏振光垂直时,偶氮苯分子不吸收能量,不发生异构化反应。用波长范围在 400~550 nm 的光源照射时,偶氮苯分子既可以由 *trans* 态转变为 *cis* 态,又可以由 *cis* 态回到 *trans* 态,发生 *trans-cis-trans* 动态异构化过程。如图 4(a)所示,用这个波段的线偏振光照射时,经过多次 *trans-cis-trans* 异构化过程,偶氮苯分子长轴与偏振光方向垂直,不吸收光,表现出光惰性,这就是偶氮苯分子的魏格特效应^[49]。伴随着偶氮苯液晶基元取向状态的变化,薄膜沿偏振光方向收缩,垂直于偏振光方向发生膨胀。如图 4(b)所示,White

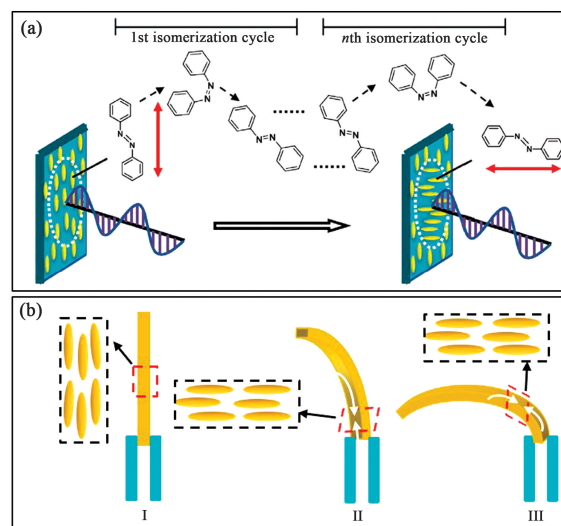


图4 (a) 魏格特效应示意图^[11]; (b) 偶氮苯液晶网络聚合物悬臂梁振动机理示意图。

Fig.4 (a) Schematic illustration of the Weigert effect. Reproduced with permission^[11]. Copyright 2021, Wiley-VCH. (b) Schematic illustration of the mechanism of the azo-LCN cantilever oscillation.

等^[20,50]利用这一性质,将其与自遮挡效应结合,制备了在偏振光(可见光)照射下具有较高振动频率、较大振幅的振动器。偏振光照射时,薄膜向光一侧发生收缩,朝入射光方向弯曲;达到最大弯曲角度(大于 90°)时,偏振光照射在薄膜的背光一侧,背光一侧发生收缩,薄膜朝初始位置方向运动;薄膜向光一侧重新被光源照射,朝入射光方向运动,表现为周期振动行为。尽管通过对薄膜的尺寸进行调控,驱动器的振动频率可以达到 270 Hz 左右,振幅可以达到 250° 左右,但是需要较强的激光光源照射(光强在 1 W/cm^2 以上)。

鉴于无规振动行为难以调控和分析,而实际应用场景具有多样性的需求,因此需要构筑具有多种调控方式的周期振动驱动器。北京大学于海峰课题组^[51]在前期研究工作的基础上,将带有羧基官能团的偶氮羧酸与具有紫外-可见光响应的氰基偶氮苯分子共聚,制备了具有紫外-可见光响应的偶氮苯液晶聚合物/Kapton[®] 双层膜。该双层膜具有快速的光致弯曲行为,光源关闭后,薄膜会由弯曲状态迅速回复到初始状态。同时,这种光致弯曲行为具有良好的可逆性和稳定性。如图 5 所示,通过改变光强、薄膜的尺寸、光源位置、负载的重量来调控惯性,制备具有自振动行为的驱动器。如图 5(a)和 5(b)所示,光强由 120 mW/cm^2 增加到 200 mW/cm^2 ,双层膜的弯曲角度呈增加趋势,最大弯曲角度由 50° 增加到 70° ,薄膜由无规振动逐渐变为周期振动,但是振幅很小,不足 1° 。如图 5(c)和 5(d)所示,弯曲角度随薄膜长度的增加逐渐变大。当薄膜长度大于 35 mm 时,薄膜出现自振动行为。但是,由于薄膜刚度降低,越过平衡位置后不能提供足够的回复力使薄膜向初始位置运动,因此呈现的是一种阻尼振动行为。如图 5(e)和 5(f)所示,当光源照射位置由驱动器的底部转移到上部的过程中,振动越来越弱。如图 5(g)和 5(h)所示,改变负载的质量,可以调控惯性,显著影响薄膜的光致弯曲行为。随着薄膜顶端粘贴负载质量的逐渐增加,薄膜的弯曲角度逐渐增大。当负载的质量达到 1.5 mg 时,驱动器出现可持续的周期振动行为。由此可以确定,惯性对于构筑周期振动器至关重要。

2.2 光热作用液晶聚合物振动器

光照时,光热试剂将光能转化为热能,聚合物

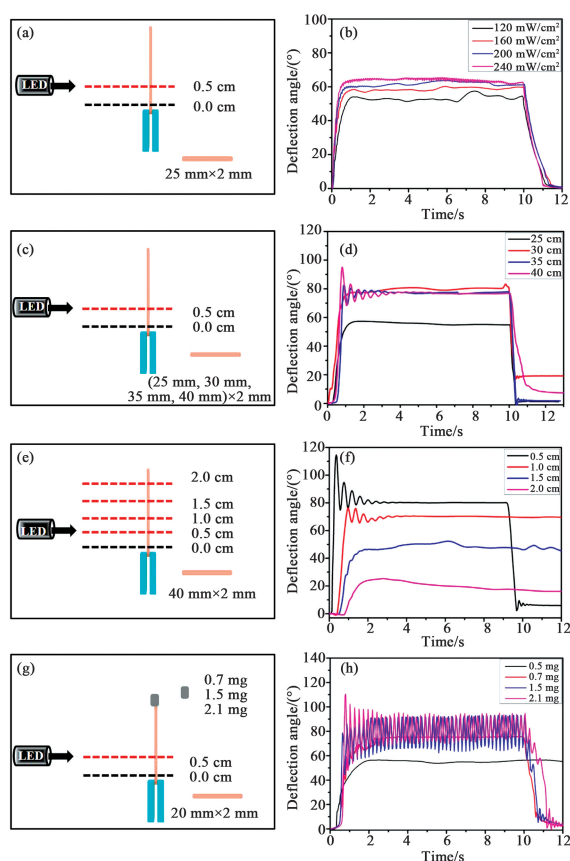


图 5 光驱动振动器的构筑。(a),(b)改变光强;(c),(d)改变薄膜的长度;(e),(f)改变光源位置;(g),(h)改变负载的质量^[51]。

Fig.5 Fabrication of light-powered self-oscillators by changing light intensity (a, b), length of the strip (c, d), light source position (e, f), loaded mass on the end of the actuator (g, h). Reproduced from Ref. [51] with permission from the Royal Society of Chemistry.

温度升高,分子链运动,聚合物的有序度降低,薄膜发生宏观形变。北京大学于海峰课题组将氧化石墨烯(GO)与聚偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物(PVDF-HFP)共混,制备了在可见光照射下像不倒翁一样持续振动的 GO/PVDF-HFP 复合膜驱动器^[52]。如图 6(a)所示,PVDF-HFP 共聚物有 3 个晶相,即 CrPs_1 、 CrPs_2 和 CrPs_3 ,对应的熔点峰分别为 $40, 75, 131^\circ\text{C}$,赋予其多重形状记忆效应。可见光照射时,GO/PVDF-HFP 复合膜由 28°C 升高至 45°C ,低于 75°C ,晶相 CrPs_1 熔融,复合膜由形状 B 变为形状 C。由于低于晶相 CrPs_2 的熔融温度,晶相 CrPs_2 起物理交联点作用。当温度低于晶相 CrPs_1 的相变温度时,复合膜可以由

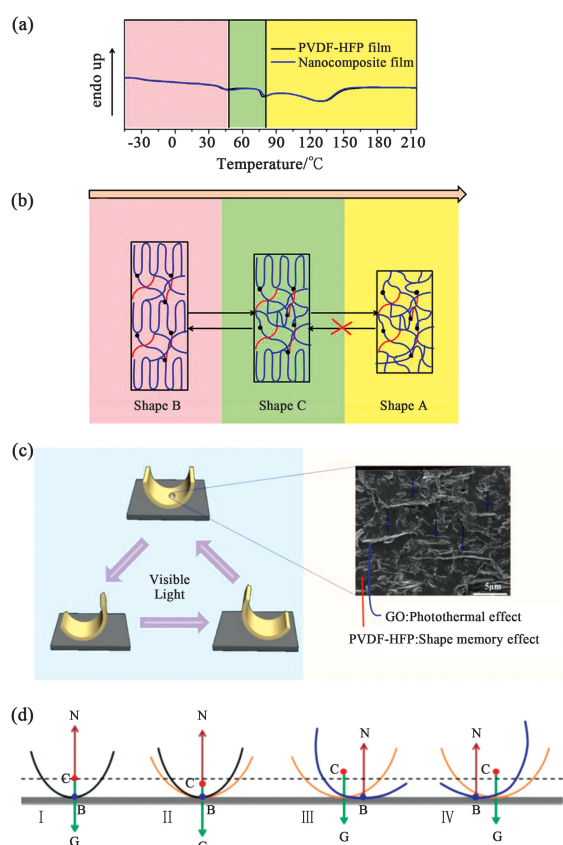


图6 (a) PVDF-HFP 和 GO/PVDF-HFP 的 DSC 曲线; (b) 复合膜的形状记忆效应示意图; (c) 可见光驱动复合膜振荡示意图; (d) 光驱动复合膜振荡机理示意图^[52]。

Fig.6 (a) DSC curves of pure PVDF-HFP and the GO/PVDF-HFP nanocomposite; (b) Scheme illustration of the microstructure of the nanocomposite film showing shape memory effect; (c) Scheme illustration of oscillation of the composite film under visible light illumination. (d) Schematic illustration of the mechanism of the light-powered oscillation. Reproduced with permission^[52]. Copyright 2015, American Chemical Society.

形状 C 回复为形状 B, 见图 6(b)。如图 6(c) 所示, 利用该复合膜的多重形状记忆效应, 制备了光响应“不倒翁”驱动器。如图 6(d) 所示, GO/PVDF-HFP 复合膜初始状态的弯曲程度为 0.6, 此时重力与支持力大小相等, 作用力在一条直线上, 处于平衡状态。光源打开后, GO 的光热效应使复合膜的弯曲程度减小为 0.5, 打破原来的平衡状态, 复合膜向右滚动。复合膜向右滚动停止时,

重心位于复合膜的左侧, 使复合膜向左侧滚动。由于惯性, 复合膜不会停留在初始位置。复合膜停止向左滚动时, 重心位于复合膜的右侧, 使复合膜向右侧滚动。在可见持续照射下, 复合膜呈现周期运动模式, 频率为 0.5 Hz。

液晶弹性体 (LCE) 的玻璃化温度低于室温, 光热试剂对 LCE 加热, LCE 由液晶态转变为各向同性态, 沿液晶基元取向方向发生收缩; 关闭光源, LCE 回复到初始状态。液晶网络聚合物 (LCN) 的玻璃化转变温度 (T_g) 较高, T_g 以下, 高分子链段的运动被限制, LCN 的摩尔体积随温度升高而增加, 沿垂直于分子长轴方向膨胀; T_g 温度以上时, LCN 的有序度随温度的升高而降低, 平行于分子长轴方向发生收缩, 垂直于分子长轴方向发生膨胀^[9]。总之, 如图 7(a) 所示, 光热效应使垂直于液晶基元长轴方向发生膨胀; 光源关闭后, 温度降低, LCE 或 LCN 回复到初始状态。

Broer 等人^[53] 将光热小分子与液晶单体混合, 采用光聚合法合成了可见光响应的 LCN。光照时, 光热小分子吸收光能, 释放热量, 对 LCN 加热, LCN 的有序度下降, 发生不对称的收缩/膨胀, 薄膜弯曲。如图 7(b) 所示, 由于惯性, 驱动器会越过平衡位置, 遮挡光源照射光响应部分, 薄膜温度降低, 驱动器向初始位置方向运动; 在自遮挡

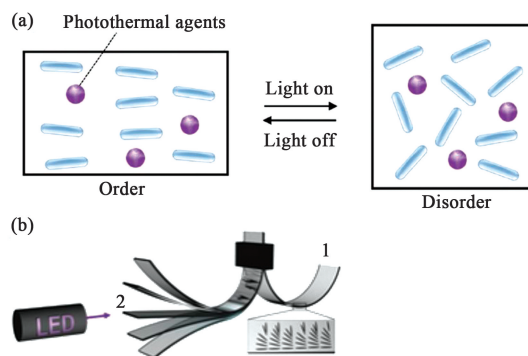


图7 (a) 光热作用诱导液晶聚合物有序-无序转变^[10]; (b) 振荡器测试装置以及液晶基元展曲取向示意图^[53]。

Fig.7 (a) Photothermal-induced order-disorder phase transition of LCPs. Reproduced with permission^[10]. Copyright 2019, Wiley-VCH; (b) Schematic representation of the setup of the oscillator and the splay alignment of liquid crystal (inset). Reproduced with permission^[53]. Copyright 2017, Wiley-VCH.

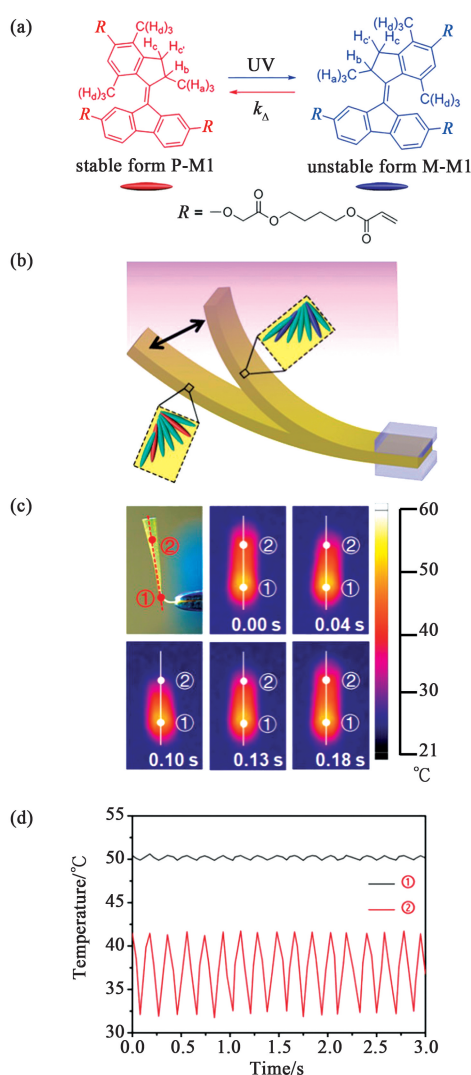


图 8 (a) 分子马达 M1 处于稳定状态 P 和不稳定状态 M 时的化学结构; (b) 光驱动振荡器示意图; (c) 振动过程中 M1-LCN 薄膜的红外热成像图; (d) 位置 1 和 2 的温度随时间变化曲线^[55]。

Fig.8 (a) Chemical structure of molecular motor M1 at stable form P and unstable form M; (b) Schematic illustration of light-driven self-oscillator; (c) Infrared thermal images of the M1-LCN film during light-driven self-oscillation; (d) Temperature profile along the red dot line at the position 1 and position 2 marked in the photograph. Reproduced with permission^[55]. Copyright 2021, Wiley-VCH.

效应作用下,驱动器表现为周期振动。不同的光热小分子具有不同的激发波长,可以通过改变光热小分子的种类来调控驱动器的响应波长。当光

热小分子为分散红 1 时,振荡器甚至可以用太阳光进行驱动。之后他们将薄膜中间部分裁去,得到两个联结在一起的振荡器,进一步研究了柔性驱动器之间的交互作用^[54]。当两个尺寸相同的振荡器同相位振动时,频率为 8.5 Hz 左右,与振荡器单独振动时的频率相同;而当两个振荡器反相位振动时,频率高于振荡器单独振动时的频率,达到 9.5 Hz。两个尺寸不同的驱动器单独运动时,振动频率分别为 5 Hz 左右和 10 Hz 左右;当两个驱动器同时运动时,振动频率约为 6 Hz 左右,说明振荡器之间会相互影响,改变了振荡器的本征振动频率。

如图 8 所示,Sun 等人^[55]合成了一种可交联的分子马达,该分子马达的转子和定子同时被交联,将吸收的光能以热能的方式释放,使液晶网络聚合物的有序度降低,发生各向异性的收缩/膨胀。通过构筑自遮挡系统,他们用这种液晶网络聚合物实现了无规振动和周期振动。

3 光驱动液晶聚合物振荡器的应用

3.1 能量转换

北京大学于海峰课题组^[56]将偶氮苯液晶聚合物滴涂在有摩擦沟槽的低密度聚乙烯(LDPE)薄膜上,溶剂挥发干燥后,在 40 °C 退火,液晶基元沿摩擦方向取向。紫外光照射时,偶氮苯分子由 *trans* 态转变为 *cis* 态,液晶聚合物层收缩,而 LDPE 光惰性层无变化,双层膜朝液晶聚合物层弯曲;光源关闭后,薄膜迅速回复为初始状态。如图 9(a)所示,双层膜一端缠绕铜线圈,置于磁场中。紫外光照射时,薄膜弯曲角度较大,可以遮挡光源,薄膜回复为初始状态,重新接受光源照射,发生弯曲,表现为周期振动。薄膜振动过程中,铜线圈切割磁感线,根据法拉第电磁感应定律,闭合回路产生交变电流,首次利用光响应液晶聚合物振荡器实现了光能-机械能-电能转换,见图 9(b)。

Lan 等人^[43]将 LCN 薄膜浸泡在盐酸多巴胺与三羟甲基氨基甲烷组成的混合溶液中,搅拌 24 h。然后用去离子水洗涤 3 次,干燥后得到含有聚多巴胺(PDA)光热涂层的 PDA/LCN 复合膜。在 808 nm 近红外光照射下,PDA 涂层吸收光能,释放热量对 LCN 加热,LCN 的有序度下降,发生各向异性的膨胀/收缩,使 LCN 弯曲。

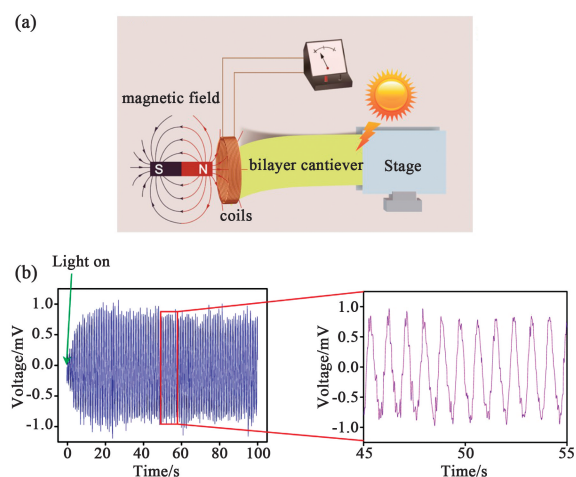


图9 (a)光驱动发电机示意图;(b)UV光源连续照射时,自遮挡双层膜系统持续输出电能^[56]。

Fig.9 (a) Schematic illustration of the light-powered electric generator; (b) Continuous outputs electricity of an automatically self-shielding bilayer film system upon continuous UV-light exposure. Reproduced with permission^[56]. Copyright 2015, American Chemical Society.

利用一部分有PDA涂层、一部分无PDA涂层的薄膜,制备了在近红外光照射下具有自振动行为的驱动器。近红外光由特定方向照射,由于PDA未涂敷区域的自遮挡作用,PDA涂层区域连续地在曝光与非曝光之间切换,使得涂敷区域出现反复的弯曲/平整形变,驱动器产生持续的振动行为。铜线圈通过细绳悬挂在磁铁附近,驱动器置于细绳附近。太阳光(太阳光模拟器产生的光)照射时,振动器周期性地撞击细绳,细绳周期振动,检测到线圈的两端有微弱的电压产生。

3.2 光学信号调制

Zeng等人^[44]将LCN薄膜的一端固定,构筑悬臂梁系统,488 nm光源沿悬臂梁长轴方向照射,实现了弯曲振动;光源沿垂直于悬臂梁边缘方向照射,实现了收缩/膨胀振动;光源沿悬臂梁侧面照射,实现了扭转振动。通过对光驱动自振动机理的研究发现,材料响应的滞后时间是维持周期振动的关键因素。他们将振动器作为斩波器来调控光学信号。相比于传统的电动斩波器系统,该系统具有体积小、质量轻、远程供能以及有可能集成到微型设备中的优点。

Lv等人^[57]通过两步交联得到自缠绕驱动器。首先将液晶单体RM82、2,2'-(1,2-乙二基双

氧代)双乙硫醇(DODT)、四(3-巯基丙酸)季戊四醇酯(PETMP)、石墨烯以及交联剂二正丙胺(DPA)组成的混合物滴涂在螺丝模具上,室温反应2 h得到轻度交联的软弹簧。然后将其拉伸,解螺旋,固定在50%的应变下24 h,使其完全交联,得到单轴取向的纤维。由于螺纹的内周长和外周长不同,沿纤维的横截面方向产生应力梯度,纤维内侧累积的应力远大于外侧累积的应力。自缠绕驱动器可以完成扭转、弯曲、卷曲、缠绕、拉伸等多种形变。将自缠绕驱动器作为软弹簧、一个悬挂的物体作为负载、近红外光源作为能量输入装置,组成光控自振动系统。这种简便的自振动系统不仅可以完成3种基本的振动模式:倾斜振动、旋转振动和上下振动,还能实现几种振动模式的切换。用反光镜替代悬挂的物体得到了由反光镜作为调制器,自缠绕驱动器作为驱动部件、近红外光源作为功能装置和调控装置的激光引导系统。

振动过程中薄膜的形状会发生周期性的改变,这种独特的属性可以用作信号的传输与调控。如图10所示,北京大学于海峰课题组^[51]将红外激光器置于振动器平衡位置的上方,驱动器振动过程中,激光的传播方向与器件的夹角发生周期性变化,反射光与透射光光强发生周期性改变。

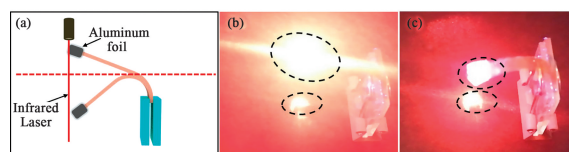


图10 (a)振动器用于光学信号传输装置示意图;(b)驱动器位于平衡位置上部;(c)驱动器在平衡位置下部^[51]。

Fig.10 (a) Schematic illustration of the oscillator transferring light signal; (b) Actuator is above the equilibrium position; (c) Actuator is below the equilibrium position. Reproduced from Ref.[51] with permission from the Royal Society of Chemistry.

3.3 光驱动马达及仿生应用

如图11(a)所示,Ikeda等人^[58]将含有偶氮苯的LCE薄膜的两端粘接起来,然后将其嵌套在

两个滑轮外侧,液晶基元沿着圆环方向排列。该光驱动马达左右两侧分别用不同的光源照射,紫外光照射圆环右侧,可见光照射左侧。紫外光照射时,右侧部分发生收缩,向光弯曲;可见光照射时,左侧部分发生膨胀,回复为初始形状。因为薄膜的两端被固定,形成了圆环,收缩力作用于右侧滑轮,滑轮逆时针转动,滑轮的转动使薄膜新的区域接受紫外光和可见光照射,驱动马达连续地转动。

Broer 等人^[59]将含有脲键的液晶单体作为 LCN 的光敏材料,紫外光照射时,含有脲键的液晶单体由 E 型异构体转变为 Z 型异构体,LCN 的有序度降低,薄膜由卷曲状态变为平整状态。紫外光照射时,光响应分子同时具有光热效应,使其由 Z 型异构体回复为 E 型异构体。所以光源关闭后,LCN 薄膜可以迅速回复为初始卷曲状态。将

4 片该 LCN 薄膜组成轧机,紫外光照射其中的一片 LCN 薄膜,薄膜发生形变,带动轧机转动,使另一片薄膜接受光源照射,驱动轧机持续不断地转动,见图 11(b)。

Cai 等人^[34]采用两步交联法制备了碳纳米管/液晶弹性体柱。可见光照射时,碳纳米管的光热效应使液晶弹性体柱的表面温度升高,发生相变,液晶弹性体柱表面收缩。液晶弹性体柱的两端有向上弯曲的趋势,支持力集中在弹性体柱的中间位置,支持力与重力共同作用使弹性体柱朝凸起的方向连续转动。如图 11(c)所示,将 4 个弹性体柱固定在平板上组成运载装置,携带 2 倍于液晶弹性体柱质量的重物,光照时以 0.2 mm/s 的速度运动。另外,该装置还可以在水中运动,携带少量物体时,运动速度可以达到 2 mm/s。

北京大学于海峰课题组^[60]将氰基偶氮苯液晶聚合物与高定向聚酰亚胺纤维复合,模拟了蜻蜓翅膀的微观结构,可以有效地将微观的分子变化转化为宏观的形变。该复合膜具有快速的光致弯曲能力和光致变形回复能力。同时,复合膜的弯曲角度和频率还具有可控性。然后将其构筑为光控人造蜻蜓扑翼式飞行器,并对其空气动力学行为进行了研究。

自振动作作为一种周期运动行为,本身具有能量和信息,北京大学于海峰课题组^[51]将振动器构筑为一个用来检测电荷的系统。如图 12(a)和 12(d)所示,为了使振动器可以检测电荷,将一个空心塑料胶囊置于振动器前方,振动器运动过程中与胶囊不接触。首先,将胶囊在绒布上摩擦使其带电,而振动器不作处理,保持不带电的状态。如图 12(g)所示,胶囊带电与胶囊和振动器均不带电时,驱动器的振动行为显著不同。胶囊带电时,薄膜弯曲角度和振动幅度均显著减小。这是因为胶囊带电,驱动器不带电,当振动器靠近胶囊时,二者之间存在引力,引力的存在会阻止驱动器远离胶囊,所以驱动器的弯曲角度和振幅均减小,见图 12(b)和 12(c)。当驱动器与胶囊均带相同的电荷时,驱动器的振动行为与二者均不带电时不同。这种情况下薄膜的振动行为与二者均未带电时相比,相位发生了改变(图 12(h))。这是因为二者带有相同电荷,驱动器靠近胶囊时,二者之间产生斥力,阻碍驱动器靠近,所以振动器的相位发生变化,见图 12(e)和 12(f)。

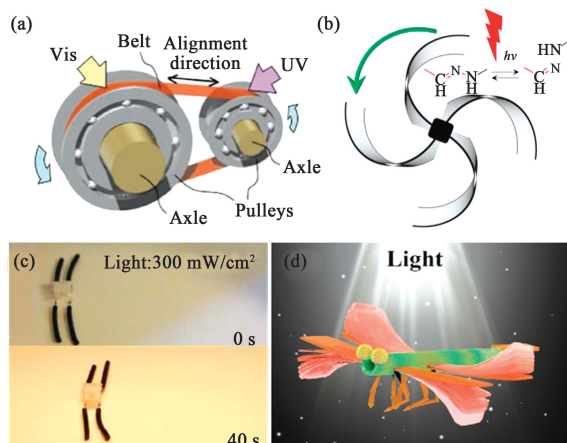


图 11 (a)光驱动马达示意图^[58]; (b)光驱动轧机示意图^[59]; (c)光源照射时,由 4 个 LCE-CNT 棒组成的驱动器在平面上移动^[34]; (d)光驱动仿生蜻蜓示意图^[60]。

Fig.11 (a) Schematic illustration of a light-driven plastic motor. Reproduced with permission^[58]. Copyright 2008, Wiley-VCH. (b) Schematic illustration of a light-driven plastic mill. (c) A vehicle composed of four LCE-CNT rod wheels can move on a flat surface under light illumination. Reproduced with permission^[34]. Copyright 2018, American Chemical Society. (d) Schematic illustration of a light-driven artificial dragonfly device. Reproduced with permission^[60]. Copyright 2021, American Chemical Society.

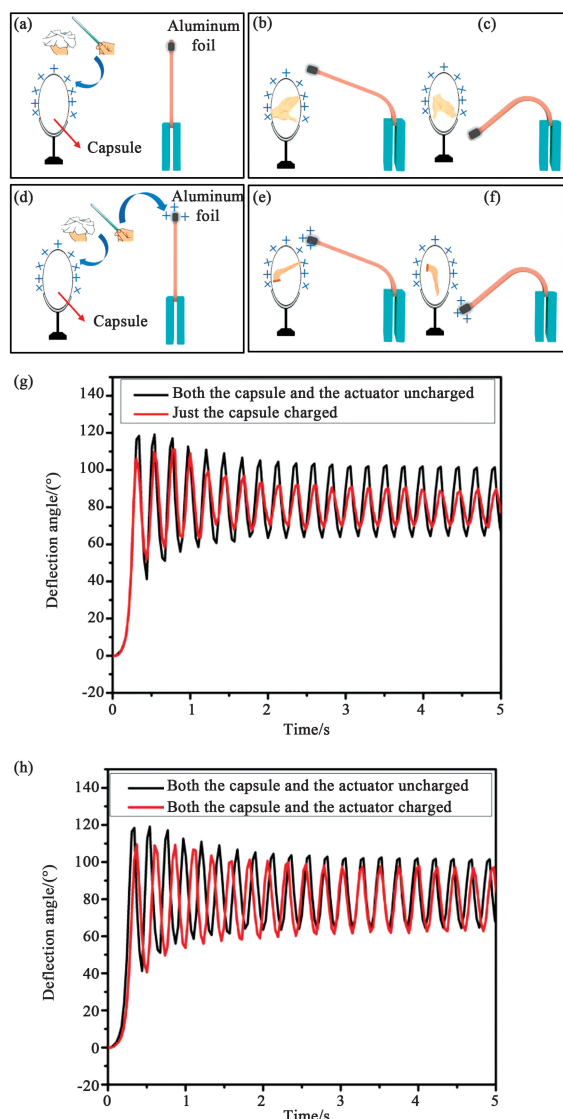


图 12 (a)胶囊带电,驱动器不带电示意图;(b),(c)胶囊带电,驱动器不带电时,驱动器的运动机理示意图;(d)胶囊与驱动器带同种电荷示意图;(e),(f)胶囊与驱动器带同种电荷时驱动器的运动机理示意图^[51];(g)胶囊带电,驱动器不带电以及二者均不带电时的振动行为;(h)胶囊和驱动器带同种电荷以及二者均不带电时的振动行为。

Fig.12 (a), (d) Setup for the oscillator detecting charge; (b), (c), (e), (f) Schemes of the possible interaction between the capsule and the oscillator when the oscillator gets closer to the capsule under two different conditions; (g), (h) Comparison of oscillating behaviours of systems charged and uncharged. Reproduced from Ref.[51] with permission from the Royal Society of Chemistry.

4 总结与展望

近年来,光驱动液晶聚合物振荡器吸引了科研人员的广泛关注,相关的研究也越来越深入。本文讨论了光化学作用和光热作用的液晶聚合物振荡器的工作原理和应用领域,总结了近年来国内外研究人员在该领域取得的研究进展。通过引入具有光致异构化能力的偶氮苯分子或者光热试剂(如氧化石墨烯、聚多巴胺、聚吡咯),液晶聚合物在光化学或者光热作用下发生有序-无序转变,产生宏观形变。利用材料在紫外或者可见光连续照射时,力学特性发生的非线性变化,或者人为构筑的自遮挡系统,来获得光驱动液晶聚合物振荡器。

光驱动液晶聚合物振荡器具有周期性、连续性运动的特点,使其可以应用于信号调制、能量转换、轧机、马达等。但是其振动频率一般在 10 Hz 左右,频率较低且频率可调范围较小。同时,实际应用中通常需要多种振动模式耦合,而目前所制备的光驱动液晶聚合物振荡器通常只有单一的振动模式(弯曲、收缩/膨胀或扭转),限制了其应用场景。作为光响应液晶聚合物驱动器的一员,光驱动液晶聚合物振荡器还面临着该领域亟待解决的共性问题。首先,作为常用的光敏材料,偶氮苯的吸收波长在紫外光附近,但是它的摩尔消光系数大,紫外光的穿透能力有限且对一般生物体有害,因此需要开发具有可见或近红外光响应的新型光敏材料^[61]。其次,随着制备技术的发展,已有多种方法可以用来构筑宏观取向的液晶聚合物材料,但这些材料通常为薄膜状或者长条状^[62],依靠材料的弯曲或者膨胀/收缩来完成相对简单的运动模式,因此急需开发新的加工工艺来制备结构新颖的驱动器,以实现更复杂的运动模式,满足实际需求。另外,常用的 LCE 或者 LCN 材料通常为共价键交联结构,很难对其重新加工利用,因此亟待开发可重新加工利用的(如动态共价键交联)液晶聚合物驱动器。此外,目前光响应液晶聚合物驱动器还停留在实验室阶段,需要将其与其他功能器件整合在一起以拓展其应用领域。尽管光驱动液晶聚合物振荡器面临上述提到的一些问题,相信在科研工作者的不断努力下,一定会拓宽这类驱动器的制备、加工和应用的空间,使其走向真正的应用。

参 考 文 献:

- [1] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots [J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
- [2] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, *et al.* An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots [J]. *Nature*, 2016, 536(7617): 451-455.
- [3] KIM J, KIM J W, KIM H C, *et al.* Review of soft actuator materials [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(12): 2221-2241.
- [4] LEE C, KIM M, KIM Y J, *et al.* Soft robot review [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2017, 15(1): 3-15.
- [5] YANG H, LEOW W R, WANG T, *et al.* 3D printed photoresponsive devices based on shape memory composites [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(33): 1701627.
- [6] VATANKHAH-VARNOOSFADERANI M, DANIEL W F M, ZHUSHMA A P, *et al.* Bottlebrush elastomers: a new platform for freestanding electroactuation [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(2): 1604209.
- [7] 左双双, 刁爽. 基于聚吡咯的导电聚合物驱动器的制备及驱动特性研究[J]. 分析化学, 2019, 47(12): 1960-1966.
- ZUO S S, XI S. Study on fabrication process and actuating performance of conductive polymer actuator based on polypyrrole [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(12): 1960-1966. (in Chinese).
- [8] YU Y L, NAKANO M, IKEDA T. Photoinduced bending and unbending behavior of liquid-crystalline gels and elastomers [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2004, 76(7/8): 1467-1477.
- [9] WHITE T J, BROER D J. Programmable and adaptive mechanics with liquid crystal polymer networks and elastomers [J]. *Nature Materials*, 2015, 14(11): 1087-1098.
- [10] PANG X L, LV J A, ZHU C Y, *et al.* Photodeformable azobenzene-containing liquid crystal polymers and soft actuators [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(52): 1904224.
- [11] QIN L, LIU X J, YU Y L. Soft actuators of liquid crystal polymers fueled by light from ultraviolet to near infrared [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(7): 2001743.
- [12] HU W Q, LUM G Z, MASTRANGELI M, *et al.* Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion [J]. *Nature*, 2018, 554(7690): 81-85.
- [13] SANO K, ISHIDA Y, AIDA T. Synthesis of anisotropic hydrogels and their applications [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(10): 2532-2543.
- [14] YOSHIDA R. Self-oscillating gels driven by the belousov-zhabotinsky reaction as novel smart materials [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(31): 3463-3483.
- [15] MERINDOL R, WALTHER A. Materials learning from life: concepts for active, adaptive and autonomous molecular systems [J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(18): 5588-5619.
- [16] JENKINS A. Self-oscillation [J]. *Physics Reports*, 2013, 525(2): 167-222.
- [17] CHENG Q B, LIANG X D, LI K. Light-powered self-excited motion of a liquid crystal elastomer rotator [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 103(3): 2437-2449.
- [18] HUANG H B, AIDA T. Towards molecular motors in unison [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(5): 407.
- [19] MAEDA S, HARA Y, SAKAI T, *et al.* Self-walking gel [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(21): 3480-3484.
- [20] SERAK S, TABIRYAN N, VERGARA R, *et al.* Liquid crystalline polymer cantilever oscillators fueled by light [J]. *Soft Matter*, 2010, 6(4): 779-783.
- [21] UCHIDA E, AZUMI R, NORIKANE Y. Light-induced crawling of crystals on a glass surface [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7310.
- [22] WANG X Q, TAN C F, CHAN K H, *et al.* In-built thermo-mechanical cooperative feedback mechanism for self-propelled multimodal locomotion and electricity generation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3438.
- [23] KUMAR K, KNIE C, BLÉGER D, *et al.* A chaotic self-oscillating sunlight-driven polymer actuator [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11975.
- [24] HE X M, AIZENBERG M, KUKSENOK O, *et al.* Synthetic homeostatic materials with chemo-mechano-chemical self-regulation [J]. *Nature*, 2012, 487(7406): 214-218.

- [25] YOSHIDA R, UCHIDA K, KANEKO Y, *et al.* Comb-type grafted hydrogels with rapid deswelling response to temperature changes [J]. *Nature*, 1995, 374(6519): 240-242.
- [26] TABATA O, HIRASAWA H, AOKI S, *et al.* Ciliary motion actuator using self-oscillating gel [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, 95(2/3): 234-238.
- [27] SHINOHARA S I, SEKI T, SAKAI T, *et al.* Photoregulated wormlike motion of a gel [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, 47(47): 9039-9043.
- [28] WANG X J, ZHOU Q F. *Liquid Crystalline Polymers* [M]. Singapore: World Scientific, 2004: 1-4.
- [29] 卿鑫,吕久安,俞燕蕾.光致形变液晶高分子[J].高分子学报,2017(11):1679-1705.
- QING X, LV J A, YU Y L. Photodeformable liquid crystal polymers [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2017(11): 1679-1705. (in Chinese).
- [30] 陈巧梅,杨洋,危岩,等.含可交换动态共价键的液晶聚合物驱动器[J].高分子学报,2019,50(5):451-468.
- CHEN Q M, YANG Y, WEI Y, *et al.* Liquid crystalline polymer actuators with exchangeable dynamic covalent bonds [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2019, 50(5): 451-468. (in Chinese).
- [31] IKEDA T, MAMIYA J I, YU Y L. Photomechanics of liquid-crystalline elastomers and other polymers [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007, 46(4): 506-528.
- [32] YU H F, IKEDA T. Photocontrollable liquid-crystalline actuators [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(19): 2149-2180.
- [33] LU C, YANG Y, WANG J, *et al.* High-performance graphdiyne-based electrochemical actuators [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 752.
- [34] AHN C, LI K, CAI S Q. Light or thermally powered autonomous rolling of an elastomer rod [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(30): 25689-25696.
- [35] YUNAS J, MULYANTI B, HAMIDAH I, *et al.* Polymer-based mems electromagnetic actuator for biomedical application: a review [J]. *Polymers*, 2020, 12(5): 1184.
- [36] SUN Z F, YAMAUCHI Y, ARAOKA F, *et al.* An anisotropic hydrogel actuator enabling earthworm-like directed peristaltic crawling [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(48): 15772-15776.
- [37] LI M T, WANG X, DONG B, *et al.* In-air fast response and high speed jumping and rolling of a light-driven hydrogel actuator [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3988.
- [38] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, *et al.* Soft robotics for chemists [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(8): 1890-1895.
- [39] JEON J, CHOI J C, LEE H, *et al.* Continuous and programmable photomechanical jumping of polymer monoliths [J]. *Materials Today*, 2021, 49: 97-106.
- [40] HU Y, LI Z, LAN T, *et al.* Photoactuators for direct optical-to-mechanical energy conversion: from nanocomponent assembly to macroscopic deformation [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(47): 10548-10556.
- [41] STOYCHEV G, KIRILLOVA A, IONOV L. Light-responsive shape-changing polymers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(16): 1900067.
- [42] BISOYI H K, URBAS A M, LI Q. Soft materials driven by photothermal effect and their applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(15): 1800458.
- [43] LAN R C, SUN J, SHEN C, *et al.* Near-infrared photodriven self-sustained oscillation of liquid-crystalline network film with predesignated polydopamine coating [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(14): 1906319.
- [44] ZENG H, LAHIKAINEN M, LIU L, *et al.* Light-fuelled freestyle self-oscillators [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5057.
- [45] 刘耀华,刘育.基于偶氮功能基的光控超分子组装[J].化学进展,2019,31(11):1528-1539.
- LIU Y H, LIU Y. Photo-controlled supramolecular assemblies based on azo group [J]. *Progress in Chemistry*, 2019, 31(11): 1528-1539. (in Chinese).
- [46] WANG J C, HUANG S, ZHANG Y H, *et al.* Hydrogen bond enhances photomechanical swing of liquid-crystalline polymer bilayer films [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(5): 6585-6596.
- [47] MA S D, LI X, HUANG S, *et al.* A light-activated polymer composite enables on-demand photocontrolled mo-

- tion: transportation at the liquid/air interface [J]. *Angewandte Chemie*, 2019, 131(9): 2681-2685.
- [48] LI X, MA S D, HU J, *et al.* Photo-activated bimorph composites of kapton and liquid-crystalline polymer towards biomimetic circadian rhythms of *Albizia julibrissin* leaves [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(3): 622-629.
- [49] WEIGERT F. Über einen neuen effekt der strahlung in lichtempfindlichen schichten [M]//*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 21. 1919: 479-491.
- [50] WHITE T J, TABIRYAN N V, SERAK S V, *et al.* A high frequency photodriven polymer oscillator [J]. *Soft Matter*, 2008, 4(9): 1796-1798.
- [51] WANG J C, SONG T F, ZHANG Y H, *et al.* Light-driven autonomous self-oscillation of a liquid-crystalline polymer bimorph actuator [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(37): 12573-12580.
- [52] YU L, YU H F. Light-powered tumbler movement of graphene oxide/polymer nanocomposites [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(6): 3834-3839.
- [53] GELEBART A H, VANTOMME G, MEIJER E W, *et al.* Mastering the photothermal effect in liquid crystal networks: a general approach for self-sustained mechanical oscillators [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(18): 1606712.
- [54] VANTOMME G, ELANDS L C M, GELEBART A H, *et al.* Coupled liquid crystalline oscillators in Huygens' synchrony [J]. *Nature Materials*, 2021, 20(12): 1702-1706.
- [55] SUN J, HU W, ZHANG L Y, *et al.* Light-driven self-oscillating behavior of liquid-crystalline networks triggered by dynamic isomerization of molecular motors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(33): 2103311.
- [56] TANG R, LIU Z Y, XU D D, *et al.* Optical pendulum generator based on photomechanical liquid-crystalline actuators [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(16): 8393-8397.
- [57] HU Z M, LI Y L, LV J A. Phototunable self-oscillating system driven by a self-winding fiber actuator [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3211.
- [58] YAMADA M, KONDO M, MAMIYA J I, *et al.* Photomobile polymer materials: towards light-driven plastic motors [J]. *Angewandte Chemie*, 2008, 120(27): 5064-5066.
- [59] VANTOMME G, GELEBART A H, BROER D J, *et al.* A four-blade light-driven plastic mill based on hydrazone liquid-crystal networks [J]. *Tetrahedron*, 2017, 73(33): 4963-4967.
- [60] SONG T F, LEI H Y, CLANCY A J, *et al.* Supramolecular hydrogen bond enables Kapton nanofibers to reinforce liquid-crystalline polymers for light-fueled flight [J]. *Nano Energy*, 2021, 87: 106207.
- [61] 郑明心, 曾敏, 陈曦, 等. 光响应形变液晶聚合物的结构与应用[J]. 化学进展, 2021, 33(6): 914-925.
- ZHENG M X, ZENG M, CHEN X, *et al.* Structures and applications of photo-responsive shape-changing liquid crystal polymers [J]. *Progress in Chemistry*, 2021, 33(6): 914-925. (in Chinese).
- [62] 王猛, 马丹阳, 王成杰. 近红外光响应液晶弹性体[J]. 化学进展, 2020, 32(10): 1452-1461.
- WANG M, MA D Y, WANG C J. Near-infrared light responsive liquid crystal elastomers [J]. *Progress in Chemistry*, 2020, 32(10): 1452-1461. (in Chinese).

作者简介:



王建闻(1989—),男,河南平顶山人,博士,2021年于中国地质大学(北京)获得博士学位,主要从事光响应液晶聚合物复合材料研究。E-mail: wangjian-chuang2009@163.com



于海峰(1975—),男,河北秦皇岛人,博士,研究员,2003年于清华大学获得博士学位,主要从事液晶/高分子功能材料研究。E-mail: yuhaifeng@pku.edu.cn