

# 液晶弹性体刺激形变研究<sup>\*</sup>

徐婉娴 尹若元 林 里 俞燕蕾<sup>\*\*</sup>

(复旦大学材料科学系 上海 200433)

**摘 要** 开发可以通过外部刺激产生机械形变的人工致动材料是近年来的研究热点。其中,液晶弹性体因结合了聚合物网络的橡胶弹性和液晶的有序性而具有独特的性质,在热、光、电等的外界刺激下可以产生可逆的形状记忆效应。本文综述了液晶弹性体响应多种外界刺激产生各种形变的行为,主要介绍了有关热致形变液晶弹性体、电致形变液晶弹性体、化学刺激导致形变的液晶弹性体及光致形变液晶弹性体的研究进展,阐述了各类液晶弹性体产生形变的机理包括热致、电致和光致相转变,讨论了影响其响应性能的主要因素,并展望了这一领域的发展前景。

**关键词** 液晶弹性体 热致形变 电致形变 光致形变

中图分类号: O753<sup>+</sup>.2; TB381 文献标识码: A 文章编号: 1005-281X(2008)01-0140-08

## Stimuli-Responsive Deformation of Liquid-Crystalline Elastomers

Xu Wanxian Yin Ruoyuan Lin Li Yu Yanlei<sup>\*\*</sup>

(Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** There has been considerable effort to develop artificial actuator materials that can generate large mechanical deformation induced by external stimuli. Among these materials, liquid crystalline elastomers have unique properties because of combining the rubber elasticity of the polymer network and the orientational ordering of liquid crystalline moieties, and show reversible shape-recovery effects with shape memory induced by heat, light, electric field and so on. Here several kinds of stimuli-responsive deformation behavior of liquid-crystalline elastomers are reviewed. The progress on deformable liquid-crystalline elastomers in response to various external stimuli such as temperature, electric field, chemical stimulus, and light is mainly introduced. The mechanism of the deformation including thermal induced, electric-field-induced and photoinduced phase transition is described, and the dominating influence factors of their responsive performance are discussed. The potential applications of liquid-crystalline elastomers are also prospected.

**Key words** liquid-crystalline elastomers; thermal-induced deformation; electric-field-induced deformation; photoinduced deformation

### 1 引言

液晶弹性体(LCE)是指非交联型液晶聚合物经适度交联,并在各向同性态或液晶态显示弹性的聚合物<sup>[1]</sup>。根据介晶基元的排列模式不同,液晶弹性体可分为向列相液晶弹性体、近晶相液晶弹性体及胆甾相液晶弹性体等。液晶弹性体结合了液晶的各

向异性及聚合物网络的橡胶弹性,因此具有良好的外场响应性、分子协同作用和弹性。液晶弹性体可以在外场(电场、温度、光等)的刺激下通过改变介晶基元的排列而产生形状的变化。例如,把向列相液晶弹性体薄膜加热到接近相转变温度时,向列相的有序度降低,当到达相转变温度时,液晶弹性体进入基本无序的各向同性相。相转变过程中的这种分子

收稿: 2007 年 2 月, 收修改稿: 2007 年 4 月

\* 国家自然科学基金项目(No. 20404001)、上海市曙光计划(No. 05SC07)和青年科技启明星计划项目(No. 06QA14009)资助

\*\* 通讯联系人 e-mail: ylyu@fudan.edu.cn

排列变化能够引发液晶弹性体薄膜产生沿着介晶基元取向方向的收缩。当温度降低使薄膜从各向同性相(I)回到向列相(N)时,液晶弹性体又恢复到最初的尺寸(图 1)。此外,在电场作用下,介晶基元的再取向也可导致液晶弹性体发生形变。当光致变色分子(如偶氮苯)被引入到液晶弹性体中,在光照下光致变色基团发生的光化学反应能够引起液晶弹性体的有序度降低,甚至促使其发生相转变,从而导致液晶弹性体的收缩甚至是弯曲。液晶弹性体的这种外界刺激下的可逆形变使得其在微型致动器、人工肌肉等方面显示了广阔的应用前景。过去已有一些关于液晶弹性体的中文综述,如 Deng<sup>[2]</sup>、Ling<sup>[3]</sup>、Liu<sup>[4]</sup> 等人着重介绍了液晶弹性体的合成、结构及物理性质等方面的研究进展。本文则侧重于阐述液晶弹性体作为一类新型的形状记忆材料在各种外界刺激下产生的形变响应,综述了热致形变液晶弹性体、电致形变液晶弹性体及光致形变液晶弹性体等方面的研究进展。

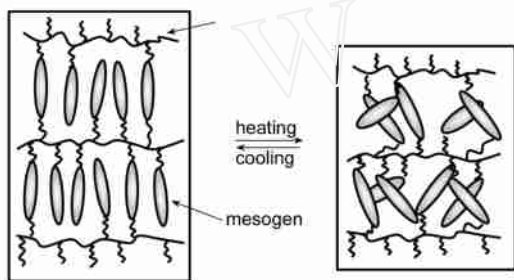


图 1 液晶弹性体的热致形变示意图

Fig. 1 Schematic representation of thermal-induced deformation of LCEs

## 2 热致形变液晶弹性体

液晶弹性体的概念由 de Gennes 在 1975 年首次提出<sup>[5]</sup>。他还进一步指出单畴向列相液晶弹性体的形状强烈依赖于有序度,而有序度是温度的函数,因此在各向同性相到向列相的相转变温度范围内,温度的细微降低可以导致液晶弹性体在保持体积基本恒定的基础上发生大尺度的单轴形变,从而产生热机械效应<sup>[6]</sup>。

1981 年 Finkelmann 等<sup>[7,8]</sup>通过二次交联法制备出世界上首例液晶弹性体(图 2)。他们还首次报道了单畴液晶弹性体被加热到液晶相到各向同性相的相转变温度时会沿着取向轴自发收缩,收缩率达到 26 %<sup>[8]</sup>。这种各向异性的形变由相转变过程中微观有序度的降低所致,同时也与介晶基元的有序度和

聚合物网络的弹性之间的耦合密切相关。Terentjev 等<sup>[9,10]</sup>确立了近晶相有序参数( $S$ )和聚合物网络的高分子链的各向异性( $A$ )之间的关系:  $S = (A - 1) / (A + 2)$ ,其中  $A$  由平行于和垂直于取向方向的基本步长的比值表示,即  $A = R_{\parallel} / R_{\perp}$ 。在近晶相,这一比值远大于 1,但经过 LC-I 的相转变后由于高分子链呈无规线团构型使得比值接近于 1,导致聚合物材料沿着液晶弹性体取向轴收缩。Terentjev 等<sup>[11]</sup>还报道了另外一种液晶弹性体,由侧链型液晶单体和作为交联剂的主链型液晶单体共同与聚硅氧烷反应制备而成(图 3)。由于主链上的介晶基元与聚合物网络的直接偶合作用,使得液晶弹性体随着交联度的增加在相转变过程中的形变量增大,最高达到 350 %。

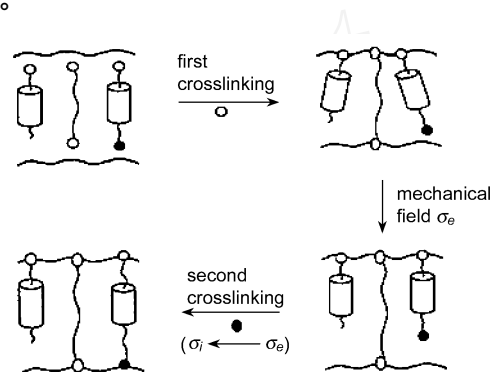


图 2 二次交联法制备液晶弹性体示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Reaction scheme of the preparation of LCEs by two-step method<sup>[8]</sup>

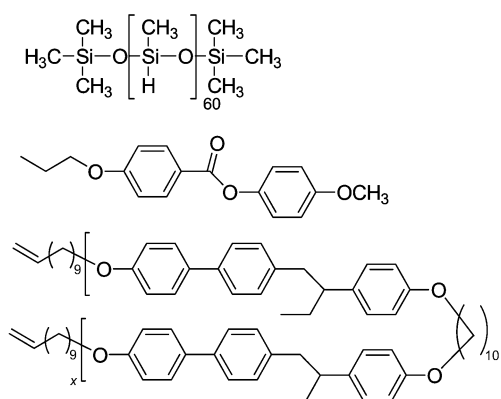


图 3 合成主链上含有介晶基元的液晶弹性体所需化合物的化学结构式<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Chemical structures of the compounds used in the preparation of LCEs with the mesogens on the main chains<sup>[11]</sup>

Broer 等<sup>[12]</sup>报道了具有扭曲取向或展开取向的胆甾相液晶弹性体薄膜的温控形变行为(图 4)。扭曲取向的薄膜由于取向复杂,产生相对复杂且难于

控制的马鞍状形变。而展开取向的薄膜取向形式简单,形变相对平滑且容易控制。正是因为各向异性聚合物的热膨胀性与分子结构和聚合条件有关,造成了具有不同取向的薄膜的热致形变行为有所不同。

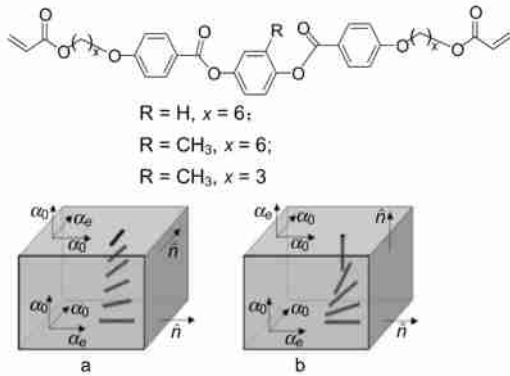


图 4 制备具有扭曲(a)和展开(b)分子取向的液晶弹性体膜所需单体的化学结构式<sup>[12]</sup>

Fig. 4 Chemical structures of the monomers used in the preparation of the LCE films with a twisted (a) or a splayed (b) molecular alignment<sup>[12]</sup>

Hiraoka 等<sup>[13]</sup>报道了单畴手性近晶相(SmC\*)液晶弹性体的双轴形状记忆效应。他们将已经经过第一次交联的液晶弹性体在机械剪切场作用下进行第二次交联,保留其近晶 C 相的分子排列。在升温过程中,近晶 C 相到近晶 A 相(SmA)的相转变引起了分子倾斜度的改变,从而使液晶弹性体产生剪切形变;近晶 A 相到各向同性相的转变则导致了液晶弹性体的收缩。在降温过程中,液晶弹性体的这种双轴形变能够可逆地恢复。这说明该类液晶弹性体薄膜具有双轴记忆效应的宏观特性。样品观察和 X 射线分析之间的一致性表明,与近晶 C 相液晶弹性体薄膜的形状相关的宏观对称性和液晶相所致的微观局域对称性密切相关。

因为骨骼肌是沿着肌肉纤维轴的方向各向异性地伸缩的,所以大量的研究致力于利用液晶弹性体制备人工肌肉这一领域。Ratna 和 Naciri 等<sup>[14]</sup>合成了具有腰挂型侧链介晶基元的液晶弹性体(图 5),并研究了其在 N-I 相转变过程中的热弹性。发现液晶弹性体在相转变过程中产生了 35%—40% 的大幅度收缩,收缩力达到了 270 kPa,与肌肉的收缩力大致相当。

他们还制备了介晶基元高度取向的液晶弹性体纤维<sup>[15]</sup>。此纤维由侧链端基含有部分羟基基团的三元线形液晶聚合物和二异氰酸酯类化合物反应交

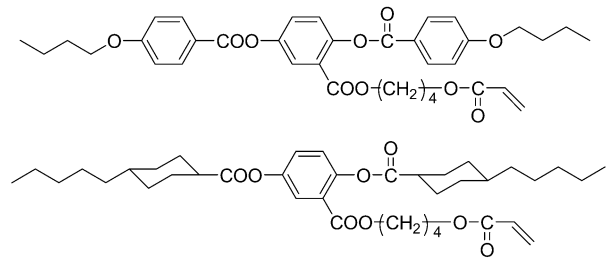


图 5 制备腰挂式液晶弹性体膜所需单体的化学结构式<sup>[14]</sup>

Fig. 5 Chemical structures of the monomers used in the preparation of side-on LCE films<sup>[14]</sup>

联后得到。其相转变过程中的应变达到了 35%,收缩力接近 300 kPa。Li 等<sup>[16]</sup>首次合成了类似肌肉的具有层状结构的三嵌段液晶弹性体共聚物(图 6),并通过改变温度使其产生了 18% 的收缩。该研究表明合成具有精确结构及单一分子量分布的嵌段共聚物是得到三嵌段弹性体人工肌肉的关键步骤。

Keller 等<sup>[17]</sup>利用光刻胶技术成功制备了微米尺寸的液晶弹性体圆柱矩阵(图 7)。所使用的软模具是对紫外光不存在吸收且易于去除的聚二甲基硅氧

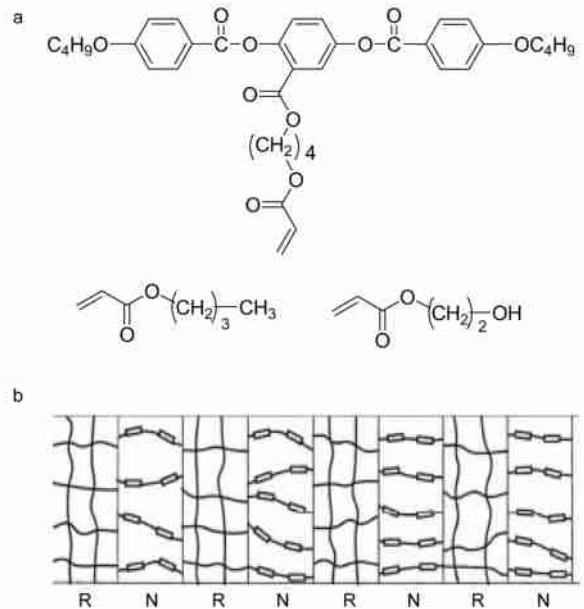


图 6 (a) 腰挂式向列相液晶单体和其他所使用单体的化学结构式; (b) 可作为人工肌肉的三嵌段共聚物 RNR,其中 R 表示交联的弹性体嵌段, N 表示向列相嵌段<sup>[16]</sup>

Fig. 6 (a) Chemical structures of a side-on nematic monomer and other used monomers; (b) A striated artificial muscle based on a triblock copolymer, RNR. R, crosslinked elastomer block; N, nematic block<sup>[16]</sup>

烷。为了使圆柱体产生大尺度的形变,在聚合之前施加一永久磁场使介晶基元在磁场的作用下沿着圆柱体的长轴取向。在惰性气氛中将软模具压入熔融的样品中使样品填满模具的内部空间,在向列相进行光聚合,得到了直径为  $20\ \mu\text{m}$ 、高度为  $100\ \mu\text{m}$  的液晶弹性体圆柱矩阵。将圆柱体切下,加热到相转变温度以上,圆柱体产生了 30%—40% 的收缩。当温度重新降低到相转变温度以下时,圆柱体可以恢复到最初的尺寸。这种微米级的致动器有望用于制备可个别控制的人工肌肉单元。

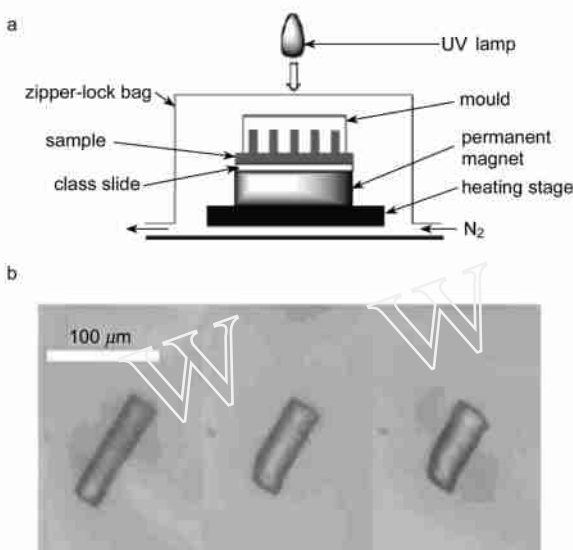


图 7 (a) 制备圆柱状液晶弹性体的实验装置; (b) 独立圆柱体(直径为  $20\ \mu\text{m}$ ) 加热到不同温度时产生沿着其长轴的 35% 的收缩(从左到右的温度分别是  $100^\circ\text{C}$ 、 $120^\circ\text{C}$  和  $130^\circ\text{C}$ )<sup>[17]</sup>

Fig. 7 (a) Experimental setup used to prepare the responsive LCE pillars; (b) An isolated pillar ( $20\ \mu\text{m}$  diameter) heated at various temperatures exhibits 35% contraction along its major axis (from left to right,  $T = 100, 120,$  and  $130^\circ\text{C}$ )<sup>[17]</sup>

### 3 电致形变液晶弹性体

介晶基元在电场作用下发生再取向也会导致液晶弹性体的形变。Urayama 等<sup>[18]</sup>报道了采用小分子液晶溶胀的向列相液晶弹性体——向列相凝胶在电场作用下介晶基元取向旋转达到  $90^\circ$  的过程(图 8), 得到了在机械拉伸作用下无法完成的均一的剪切形变。研究表明,该凝胶体系只有在取向旋转的平面发生形变,与取向旋转无关的方向尺寸不变。决定凝胶发生形变的阈值是电场而不是电压,且随着关联度的降低,电光效应和电机械效应增强,阈值电场

降低。基于软弹性的概念,再取向导致的形变与取向的旋转角存在函数关系。

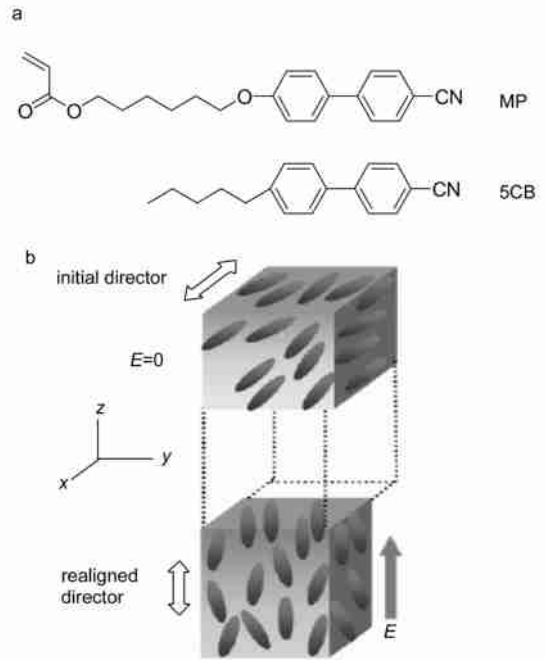


图 8 (a) 液晶单体(MP)及向列相溶剂小分子(5CB)的化学结构式; (b) 向列相凝胶处于两种极端取向状态下的示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 8 (a) Chemical structures of the reactive mesogenic monomer (MP) and the nematic solvent (5CB); (b) Schematic representation of the nematic gels in two extreme states<sup>[18]</sup>

铁电液晶弹性体存在压电性及可逆的压电效应。对手性近晶相液晶施加一方向为层面方向电场,介晶基元的取向会发生倾斜。在由单轴的近晶 A 相转变为铁电性的近晶 C 相时,这一效应更加明显,导致近晶相层厚的减少以及倾斜角的增加。因为样品体积保持恒定,厚度的减少伴随着层内介晶基元的再取向、质量传输以及侧面轮廓的延长。Kremer 等<sup>[19]</sup>报道了一种新型超薄铁电液晶弹性体膜在极低电场下的快速电致伸缩行为。在  $1.5\ \text{MV}/\text{m}$  的电场下,薄膜的厚度变化达到了 4%,对应的倾斜角为  $16^\circ$ 。在外加电场作用下,近晶 A 相的侧链介晶基元发生倾斜,且倾斜角与外加电场的强度成正比,从而导致薄膜厚度的变化。另外铁电液晶弹性体的压电模量高于已经商业化的孔材聚合物等的压电模量。

### 4 化学刺激导致形变的液晶弹性体

Harris 等<sup>[20]</sup>报道了通过改变 pH 值使液晶弹性

体发生形变的过程。此过程基于两个基本概念:取向的液晶网状结构既有共价键又有二次键如氢键;刺激控制的分子可在酸性及中性态之间转换。共价键的存在保持了分子的有序度,有效地冻结了液晶的排列,而且氢键的键强足够大,使得液晶弹性体能够承受水的渗透而不发生形变。然而与碱的中和反应可以打破氢键,因此碱存在的条件下聚合物网络转变为聚合物盐,氢键消失。聚合物盐降低了向列相液晶的有序度,形成了 pH 所致的宏观形变(收缩)。在酸的作用下氢键又能重新形成,从而使体系恢复到最初的尺寸。由于聚合物盐比氢键存在的聚合物网络更易吸水,在较湿的环境下作为分子致动器的聚合物盐单元沿着垂直取向的方向溶胀。当这些分子致动器相互平行排列时,液晶弹性体在垂直于取向方向上发生宏观的大尺度膨胀。加入少量酸,体系即失活恢复到无水态,使体系对水不再敏感。

## 5 光致形变液晶弹性体

将偶氮苯、1,2-二苯乙炔、倂精酸酐等光致变色分子引入到液晶体系中,通过光致变色分子的光化学反应可等温地引发液晶的相转变,即光化学相转变<sup>[21-23]</sup>。如上所述,液晶弹性体具有良好的热弹性,即在热引起的相转变过程中液晶弹性体沿着介晶基元的排列方向收缩和扩张。将此种性质与光化学相转变结合就实现了液晶弹性体的光致形变<sup>[24-26]</sup>。因为光是一种可被快速、精确、远程控制的清洁能源,所以光致形变液晶弹性体成为人们研究的新热点。

Finkelmann 等<sup>[24]</sup>报道了以聚硅氧烷为主链、偶氮苯基团位于交联部分的单畴向列相液晶弹性体在紫外光照射下由偶氮苯异构引发的光致收缩行为。因为液晶分子通过共价交联形成了三维的聚合物网络结构,偶氮苯的顺反异构与交联网络的耦合导致了液晶弹性体沿着取向轴的单轴收缩。Keller 等<sup>[27]</sup>通过光聚合合成了含偶氮苯的腰挂型向列相液晶弹性体薄膜。该薄膜在紫外光的照射下快速收缩,收缩率达到 18%,加热使得薄膜恢复原状。

Ikeda 和俞燕蕾等<sup>[28]</sup>首先报道了含有偶氮苯的液晶弹性体薄膜的三维运动——光致弯曲,研究了紫外光和可见光照射后向列相液晶弹性体薄膜的弯曲和恢复行为。观察到液晶弹性体薄膜在紫外光的照射下朝着入射光方向弯曲,用可见光照射后薄膜恢复到最初的平展状态。他们发现薄膜的弯曲行为

是各向异性的,只沿着摩擦方向弯曲。而且加热和采用良溶剂溶胀的方法以促进高分子链段的运动对实现光致弯曲很重要(图 9)。与二维运动模式的光致收缩相比,光致弯曲模式在人工手、微型机器人的应用方面更具优势。

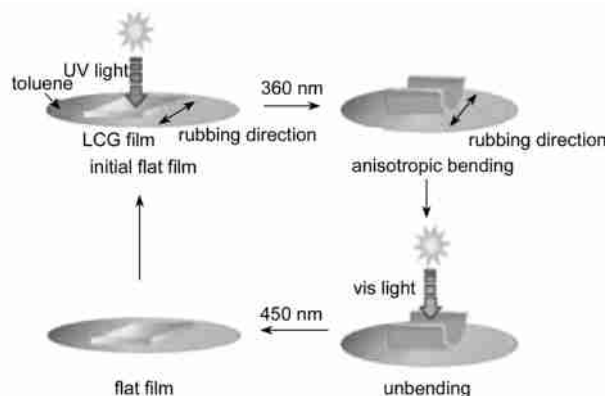


图 9 用甲苯溶胀的偶氮苯液晶弹性体膜的光致弯曲和平展行为示意图<sup>[28]</sup>

Fig. 9 Schematic representation of the photoinduced bending and unbending behavior of the azobenzene-containing LCE films swelled in toluene<sup>[28]</sup>

紫外光的照射导致偶氮苯单元发生反式到顺式的异构,降低了向列相的有序度甚至可以引起向列相到各向同性相的转变。但是,偶氮苯单元在 360 nm 的吸光系数很大,以至于 99% 以上的入射光子被厚度小于 1  $\mu\text{m}$  的表面区域吸收。上述向列相液晶弹性体薄膜的厚度一般在 10—20  $\mu\text{m}$  范围,因此只有面向入射光的表面区域发生偶氮苯的光异构,出现有序度的降低,薄膜本体部分的偶氮苯仍保持反式构象。这种情况下只有薄膜的表层发生收缩,导致薄膜向入射光的方向弯曲(图 10)。另外,偶氮苯单元优先沿着摩擦方向排列,因此有序度只沿着此方向减少导致了各向异性的弯曲行为。

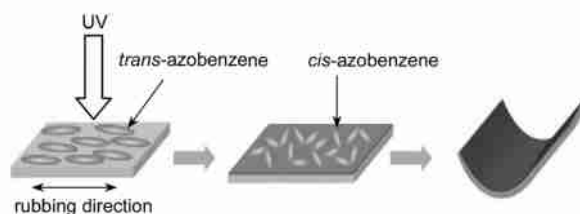


图 10 偶氮苯液晶弹性体膜的光致弯曲机理<sup>[29]</sup>

Fig. 10 Schematic representation of the bending mechanism in the azobenzene-containing LCE films<sup>[29]</sup>

不同交联度的单畴向列相液晶弹性体薄膜虽然

都能发生光致弯曲,但最大弯曲程度有所不同<sup>[29]</sup>。交联度高的薄膜有序参数高,紫外光照射后偶氮苯单元有序度的降低导致了沿着取向方向薄膜表面产生更大程度的收缩,整个薄膜的弯曲幅度也更大。利用多畴向列相液晶弹性体薄膜对线性偏振光的选择性吸收,Ikeda 和俞燕蕾等<sup>[30]</sup>进一步实现了液晶弹性体薄膜的方向可控光致弯曲(图 11)。多畴向列相液晶弹性体薄膜可沿着任意方向重复地弯曲,这是因为该薄膜的弯曲方向与入射偏振紫外光的偏振方向一致,通过改变入射光偏振方向的简单方法即可实现对弯曲方向的精确控制。这是因为该薄膜的弯曲方向与入射偏振紫外光的偏振方向一致,通过改变入射光偏振方向的简单方法即可实现对弯曲方向的精确控制。

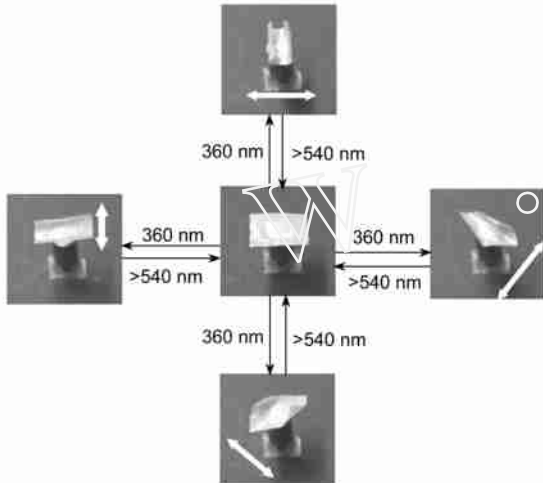


图 11 多畴液晶弹性体膜在具有不同偏振方向的 366 nm 偏振光及波长大于 540 nm 的可见光照射下的弯曲和平展行为,白色箭头表示偏振光的偏振方向<sup>[30]</sup>

Fig. 11 Photographic frames of a polydomain LCE film bending in different directions in response to irradiation of linearly polarized light at 366 nm with different polarization directions (white arrows), and being flattened again by visible light longer than 540 nm<sup>[30]</sup>

他们还制备了介晶基元分别平行于(homogeneous)和垂直于(homeotropic)薄膜表面的两类液晶弹性体膜,研究了介晶基元的取向方式对液晶弹性体光致弯曲行为的影响<sup>[31]</sup>。如图 12 所示:当采用紫外光进行照射时,具有平行取向的液晶弹性体薄膜发生各向异性的表面收缩,从而弯向光源方向;而具有垂直取向的液晶弹性体发生各向同性的表面扩张,从而弯曲方向背离光源。由于这种收缩和扩张效应只在薄膜表面发生,使得两类液晶弹性体薄膜产生了完全相反的弯曲行为。

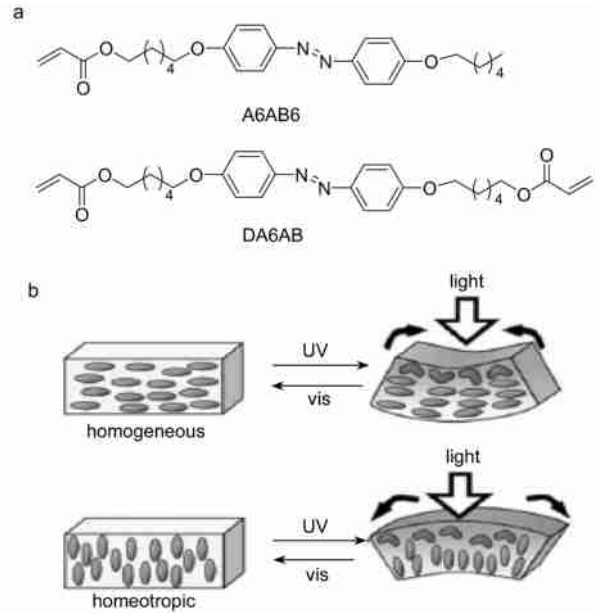


图 12 (a) 制备平行及垂直取向的液晶弹性体膜所需液晶单体及交联剂的分子结构;(b) 平行及垂直取向的液晶弹性体膜的不同弯曲机理<sup>[31]</sup>

Fig. 12 (a) Molecular structures of the LC monomer and the cross-linker used in the preparation of the homogeneous and homeotropic LCE films; (b) Schematic representation of the different bending mechanism in the homogeneous and homeotropic LCE films<sup>[31]</sup>

为了实现液晶弹性体在室温下的快速弯曲,他们还进一步制备了铁电液晶弹性体薄膜<sup>[32]</sup>。铁电液晶具有两个显著优势:一是介晶基元高度取向;二是分子自发极化从而可通过电场对介晶基元的取向进行控制。因此制备铁电液晶弹性体采用的是在施加外电场的情况下进行原位光聚合的方法。得到的铁电液晶弹性体每层分子的取向方向相同,但与摩擦方向并不平行,二者之间存在一倾斜角(图 13)。当紫外光照射时,薄膜沿着介晶基元的取向方向而不是摩擦方向弯曲,当可见光进行照射时,薄膜恢复到最初的平展状态。因为所制备的铁电液晶弹性体具有较低的玻璃化转变温度( $T_g$  20 ),弯曲可以在室温下进行。又因其取向度高,因此比向列相液晶弹性体响应速度快、弯曲程度大,在光强为 280 mW/cm<sup>2</sup> 的氩离子激光(364 nm)照射下在 500 ms 内即可完成弯曲过程。

Palfy-Muhoray 等<sup>[33]</sup>报道了小分子偶氮苯掺杂的液晶弹性体在波长为 514 nm 的激光照射下的快速弯曲行为,弯曲角度达到了 60 以上。快速的光致形变使液晶弹性体以一种新的方式与环境相互作用

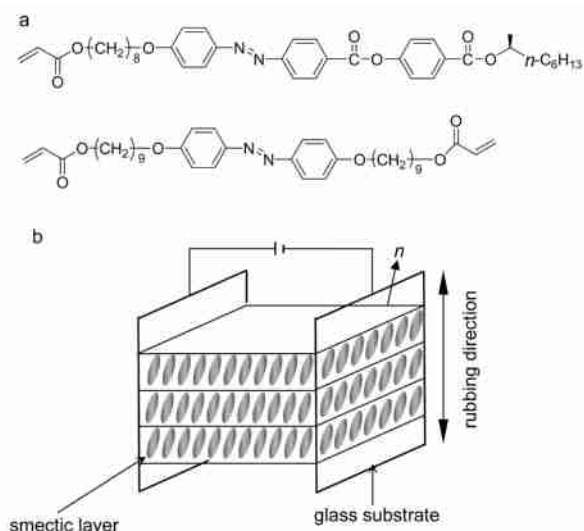


图 13 (a) 制备铁电液晶弹性体膜所需单体和交联剂的分子结构; (b) 偶氮苯介晶基元取向示意图:介晶基元相互平行排列形成近晶相的层,且取向方向  $n$  与摩擦方向之间存在一个倾斜角<sup>[32]</sup>

Fig. 13 (a) Molecular structures of the LC monomer and the crosslinker used for the preparation of the ferroelectric LCE films; (b) Schematic representation of the alignment of azobenzene mesogens: mesogens are aligned parallel to each other to form layers with a tilt between the director ( $n$ ) and the rubbing direction<sup>[32]</sup>

用:当用可见光照射浮在水面上的液晶弹性体薄膜时,收缩的构象增加了系统的能量,液晶弹性体薄膜弯曲并游离光源。如果光照后的构象不是收缩而是伸长,薄膜将游向光源。因此光源不仅为形变提供了能量还提供了位置信息。该研究中由于使用的激光强度大,在光致形变的同时存在热致形变的可能性较大。Serak 等<sup>[34]</sup>也报道了由于激光照射能够引起偶氮苯液晶弹性体薄膜的表面收缩和扩张,从而使得薄膜的形状发生快速且强烈的改变。改变激光的偏振方向即可以可逆地改变液晶弹性体的弯曲或扭曲方向。与上述研究的体系不同,该体系利用了介晶基元的再取向,使形变可以在室温下发生,且可以被较低能量的激光很好地控制。

Yang 等<sup>[35]</sup>报道了通过模具成型制备小尺寸单畴液晶弹性体的方法,得到了表面宽为 700 nm、高为 40 nm 圆柱矩阵的液晶弹性体(图 14)。通过改变温度或进行紫外光照射,液晶弹性体可以在圆柱形和雪茄状间进行可逆变换。这种表面形状的可逆改变使得这种液晶弹性体可用于制造可配置的光学元件。

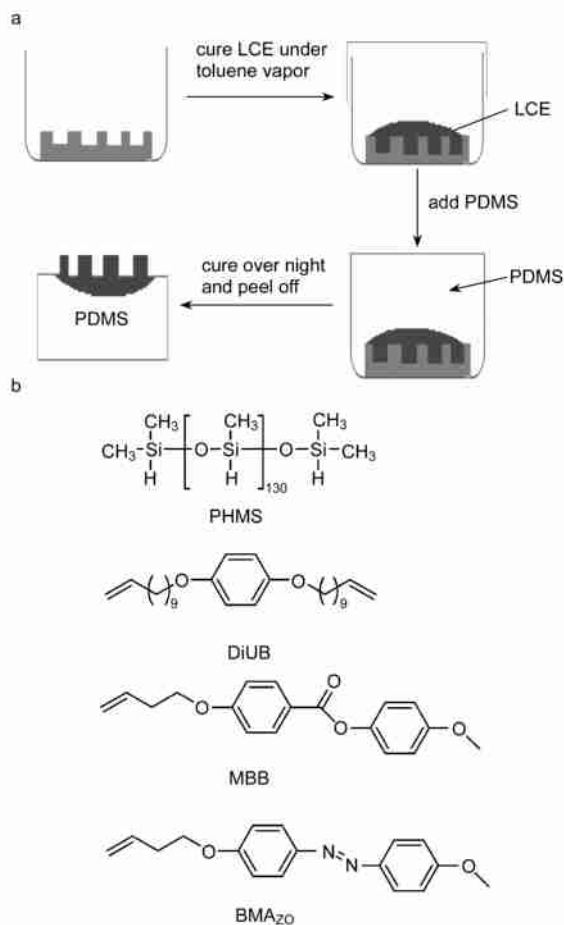


图 14 (a) 液晶弹性体图记的制备过程; (b) 合成液晶弹性体所需化合物的分子结构<sup>[35]</sup>

Fig. 14 (a) Schematic representation for the preparation procedure of the LCE stamp; (b) Molecular structures of the compounds used in the preparation of the LCEs<sup>[35]</sup>

## 6 结语

液晶弹性体结合了弹性和液晶性,是一种具有独特性质的新型超分子体系。液晶弹性体对环境(电场、温度、化学环境、光等)很敏感,可以发生各向异性的可逆形变,而且成功实现了三维弯曲运动。作为软致动材料,液晶弹性体具有广阔的应用前景,尤其是光致形变液晶弹性体的功能实现完全由光控制,不需要任何电池、电动机、齿轮等的介入,材料容易实现小型化,可为微型机器人与微机电系统(MEMS)提供重要的致动部件。但是目前液晶弹性体类材料的抗疲劳性、生物相容性等问题还未解决,有待进一步的深入研究。

## 参考文献

- [1] 李敏 (Li M), 邱洪晋 (Qiu H J). 高分子通报 (Polymer Bulletin), 1998, 3: 72-77

- [ 2 ] 邓登 (Deng D), 朱光明 (Zhu GM), 宋斐 (Song F). 化学进展 (Progress in Chemistry), 2006, 18(10): 1352—1360
- [ 3 ] 凌有道 (Ling Y D), 吕满庚 (Lu M G). 现代化工 (Modern Chemical Industry), 2005, 25 (S1): 84—88
- [ 4 ] 戴俊燕 (Dai J Y), 刘伟昌 (Liu W C), 刘德山 (Liu D S). 功能高分子学报 (Journal of Functional Polymers), 2000, 13(3): 349—357
- [ 5 ] De Gennes P G, Seances C R. Acad. Sci. B, 1975, 281: 101—103
- [ 6 ] De Gennes P G, Hebert M, Kant R. Macromol. Symp., 1997, 113: 39—49
- [ 7 ] Finkelmann H, Köck H J, Rehage G. Makromol. Chem. Rapid Commun., 1981, 2: 317—322
- [ 8 ] Kupfer J, Finkelmann H. Makromol. Chem. Rapid Commun., 1991, 12: 717—726
- [ 9 ] Warner M, Terentjev E M. Prog. Polym. Sci., 1996, 21: 853—891
- [ 10 ] Warner M, Terentjev E M. Liquid Crystal Elastomers. UK: Oxford Univ. Press, 2003
- [ 11 ] Clarke S M, Hotta A, Terentjev E M, et al. Phys. Rev. E, 2001, 64: art. no. 061702
- [ 12 ] Møl GN, Harris K D, Broer D J, et al. Adv. Funct. Mater., 2005, 15: 1155—1159
- [ 13 ] Hiraoka K, Sagano W, Nose T, et al. Macromolecules, 2005, 38: 7352—7357
- [ 14 ] Thomsen D L, Keller P, Ratna B R, et al. Macromolecules, 2001, 34: 5868—5875
- [ 15 ] Naciri J, Srinivasan A, Jeon H, et al. Macromolecules, 2003, 36: 8499—8505
- [ 16 ] Li M H, Keller P, Yang J, et al. Adv. Mater., 2004, 16: 1922—1925
- [ 17 ] Buguin A, Li M H, Keller P, et al. J. Am. Chem. Soc., 2006, 128: 1088—1089
- [ 18 ] Urayama K, Honda S, Takigawa T. Macromolecules, 2006, 39: 1943—1949
- [ 19 ] Lehmann W, Skupin H, Kremer F, et al. Nature, 2001, 410: 447—450
- [ 20 ] Harris K D, Bastlaansen C W M, Lub J, et al. Nano Lett., 2005, 5: 1857—1860
- [ 21 ] Ikeda T, Kanazawa A. Bull. Chem. Soc. Jpn., 2000, 73: 1715—1733
- [ 22 ] Ikeda T. J. Mater. Chem., 2003, 13: 2037—2057
- [ 23 ] Ikeda T, Tsutsumi O. Science, 1995, 268: 1873—1875
- [ 24 ] Finkelmann H, Nishikawa E, Pereira G G, et al. Phys. Rev. Lett., 2001, 87: art. no. 015501
- [ 25 ] Hogan P M, Tajbakhsh A R, Terentjev E M. Phys. Rev. E, 2002, 65: art. no. 041720
- [ 26 ] Cviklinski J, Tajbakhsh A R, Terentjev E M. Eur. Phys. J. E, 2002, 9: 427—434
- [ 27 ] Li M H, Keller P, Li B, et al. Adv. Mater., 2003, 15: 569—572
- [ 28 ] Ikeda T, Nakano M, Yu Y L, et al. Adv. Mater., 2003, 15: 201—205
- [ 29 ] Yu Y L, Nakano M, Ikeda T, et al. Chem. Mater., 2004, 16: 1637—1643
- [ 30 ] Yu Y L, Nakano M, Ikeda T. Nature, 2003, 425: 145—145
- [ 31 ] Kondo M, Yu Y L, Ikeda T. Angew. Chem. Int. Ed., 2006, 45: 1378—1382
- [ 32 ] Yu Y L, Maeda T, Ikeda T, et al. Angew. Chem. Int. Ed., 2007, 46: 881—883
- [ 33 ] Camacho-Lopez M, Finkelmann H, Palfy-Muhoray P, et al. Nature Mater., 2004, 3: 307—310
- [ 34 ] Tabiryan N, Serak S, Dai X M, Bunning T. Opt. Express, 2005, 13: 7442—7448
- [ 35 ] Yang Z, Herd G A, Huck W T S, et al. J. Am. Chem. Soc., 2006, 128: 1074—1075