http://pmse.scu.edu.cn

双向形状记忆衣康酸基液晶弹性体的制备及性能

王奇勋，汪 玄，杨 荣，李锦春
(江苏省环境友好高分子材料重点实验室 常州大学材料科学与工程学院，江苏 常州 213164)

摘要：以4,4'-双(6-羟基己氧基)联苯(BHHBP)为液晶基元，同时选用衣康酸(IA)和苯基丁二酸(PSA)采用无规共聚，合成了一系列IA添加量不同的含有甲叉基侧基的联苯液晶共聚酯(LCPs)。通过在液晶态对其进行拉伸取向，然后利用紫外光照射引发交联的方法，制备获得了单畴取向的联苯液晶弹性体(LCEs)。研究了光交联单体含量对LCPs的相变行为和LCEs的热致可逆驱动的影响。结果表明，IA的引入使LCPs仍表现出长程层间的有序性，既保留有近晶结构，同时又升高了近晶相-各向同性相相变温度。当IA的添加量达到30%时，液晶相转变温度也从70.4 ℃上升至80.6 ℃。此外，发现当引入IA到达一定量时，材料可以获得更为完善的交联网络构型，同时也赋予其可观的可逆形状致动度。

关键词：双向形状记忆；衣康酸；液晶弹性体；可逆致动器
中图分类号：TB381 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2023)09-0001-08

形状记忆聚合物(SMPs)是一种典型的智能材料，这种智能材料能够在特定的外部刺激下，例如光、电、热、酸碱度等，其宏观形貌可以发生周期性的改变，于临时形状和原始形状之间不断切换[1]。在这其中通过触发所形成的临时形状具有一定的亚稳定性，在特定的驱动条件下，材料会转变成更稳定的状态[2]。相比于单向形状记忆聚合物的简单形变表现，双向形状记忆聚合物所具有的可逆、可编程的形状变化特性，使其受到了更广泛的关注。

液晶弹性体作为一类表现出液晶性的双向形状记忆聚合物材料常被认为是人造肌肉的最佳选择，并已经在软质致动器应用方向有了很多探索[3,4]。早在1975年，de Gennes[5]就提出了关于液晶高分子软材料的设想，认为借助外部刺激改变液晶基元排列的有序度，即可改变材料的宏观形状。现阶段液晶弹性体的制备过程可以概括为“适度交联”和“取向”两个步骤。最初的“两步法”制备可以追溯到1991年Finkelmann等[6]借助分步硅氢加成反应制备的首个单畴液晶弹性体。而利用这种早期的分步概念所得到的产物，随后被证实体系内仍会残留未反应的液晶单体和交联剂。后人便在此基础上加以改良，首先在容器中制备预交联的液晶弹性体，第2步则借助外力对其进行单轴拉伸并一直保持外力的载入直到二次交联程度达到所需[7]。改良后的“两步法”目前更为常用。之后也有许多研究将偶氮苯基团引入到液晶高分子材料中，当其受到紫外-可见光照射时，偶氮苯分子会发生顺式-反式异构化的可逆转变，从而材料发生宏观可逆形变[8]。以及还出现了通过引入动态共价键来达到改善液晶弹性体加工性能的一些研究[9, 10]。

在笔者之前的工作中，合成了一种含有肉桂基的液晶聚合物，通过先在液晶相中进行单轴拉伸，后利用肉桂基的光化学反应对液晶进行交联固定，制备了一种单畴液晶弹性体[11]。而在本文中，选择在液晶聚合物分子链上引入衣康酸(IA)作为一定比例的键接基团，IA作为聚合物产业的一种生物基可再生原料，能通过发酵谷类或者木质TIN纤维得到，其具有成本低、产量大等优点[12]。IA及其衍生物的自由基聚合一直是一个较活跃的研究领域[13]，同时一些逐步聚合的相关研究，包括聚酯的合成也

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0190
收稿日期：2022-11-14
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目(51903021)
通讯联系人：李锦春，主要从事无卤阻燃高分子材料研究，E-mail: lijinchun88@163.com

不断有新的突破[14]。而在本文中，选择IA作为键接基团，在降低成本的同时又高效地引入了一定比例的反应点，使得单畴液晶弹性体的制备过程变得不再繁复，同时又收获了可观的可逆形状致动度。

1 实验部分

1.1 主要原料

4,4'-联苯二酚：分析纯，上海邦成化工有限公司；6-氯-1-己醇、苯基丁二酸、苯基双(2,4,6-三甲基苯甲酰基)氧化膦：分析纯，阿拉丁试剂有限公司；无水碳酸钾：分析纯，上海凌峰化学试剂有限公司；碘化钾：分析纯，上海申博化工有限公司；浓盐酸、衣康酸、三氯甲烷：分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 联苯二氧己醇(BHHBP)的合成

合成过程参考之前工作[15]。将10 g 4,4'-联苯二酚溶解在190 mL含有75 g碳酸钾的DMF溶液中，然后加入24 g 6-氯-1-己醇和0.3 g碘化钾。140 ℃回流24 h后，抽滤反应混合物，取滤液倒入蒸馏水中，磁力搅拌1 h，随后滴加浓盐酸调节pH值至2，形成的沉淀物过滤，取滤渣用蒸馏水多次洗涤后80 ℃真空干燥24 h。

1.3 液晶聚酯(LCPs)的合成

不同IA含量的聚合物投料摩尔比如Tab.1所示。称量8.00 g 4,4'-联苯二酚和3.22 g苯基丁二酸及0.53 g衣康酸(以LCP20为例，原料中总的二元醇酸摩尔比为1∶1，其中衣康酸含量占二元酸单体总量的20%)于三口烧瓶中，并加入0.023 g乙酸锌和0.035 g三氧化二锑为催化剂，0.058 g甲基氢醌为阻聚剂。然后在180 ℃氮气保护下反应3 h后，移除氮气装置且升温至190 ℃，40 Pa内的负压下反应5 h。LCPs的合成路线如Fig.1所示。产物用氯仿溶解，后用甲醇沉淀过滤。所得产物在45 ℃真空干燥约48 h，直到其质量保持不变。

1.4 液晶弹性体(LCEs)的制备

采用先取向再交联的“两步法”制备单畴LCEs，具体操作如下，选取2 g液晶聚酯于聚四氟乙烯的容器中加入10 mL氯仿及0.02 g苯基双(2,4,6-三甲基苯甲酰基)氧化膦(光引发剂819)，避光搅拌30 min，保证预聚体和光引发剂完全溶解后。放入通

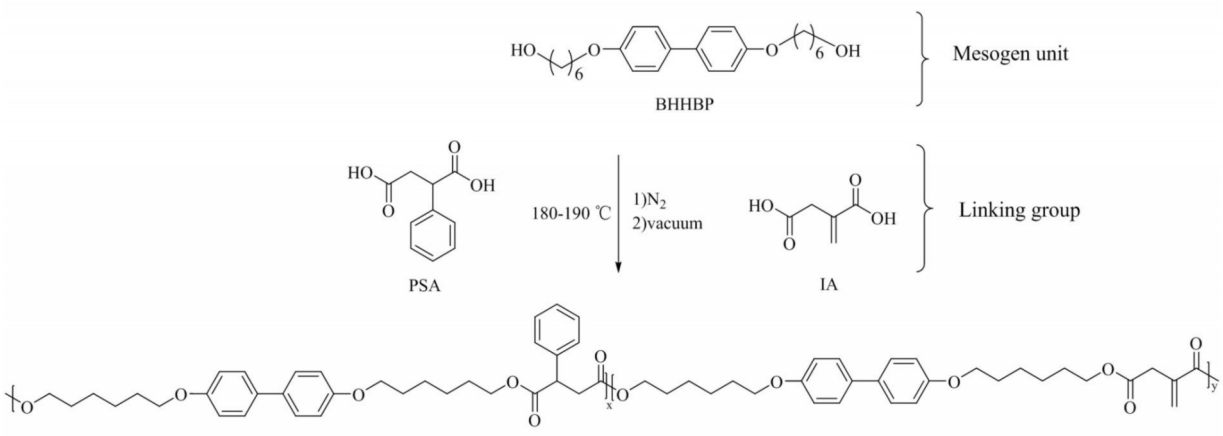


Fig. 1 Synthetic route of LCPs

Tab. 1 Monomer mole ratio, number average molecular weight and polydispersity index of LCPs

Sample	Monomer mole ratio^{fed} *n*(BHHBP):*n*(PSA):*n*(IA)	Monomer mole ratio^{calculated} *n*(PSA):*n*(IA)	$M_n\times10^{-4}$	PDI
LCP10	10:9:1	10.8	3.05	1.41
LCP20	10:8:2	5.9	3.68	1.70
LCP30	10:7:3	3.2	2.51	2.16

fed: the ratios of the amount added in the experiment; calculated: the ratios calculated by ^{1}H-NMR

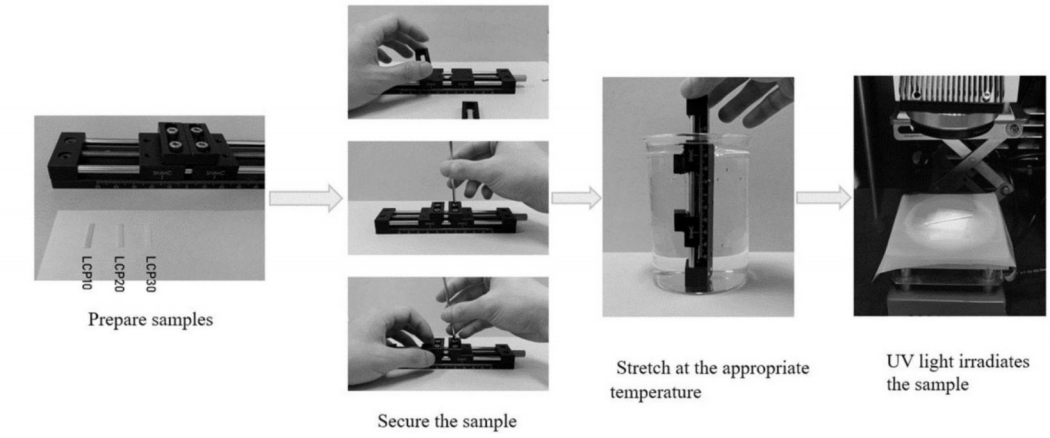


Fig. 2 Method of two-step crosslinking

风橱中24 h,并在40 ℃真空干燥24 h。得到光引发剂均匀分布的液晶聚酯薄膜(THK=0.5 mm)。随后将薄膜裁剪成15 mm×2 mm的样条,在样条于液晶态温度下进行500%倍率的拉伸,接着在波长365 nm的紫外灯下照射60 min,得到单畴液晶弹性体样品,"两步法"路线如Fig.2所示。

1.5 测试与表征

1.5.1 核磁共振波谱(^{1}H-NMR)分析:采用德国Bruker AVANCE II 500M核磁共振波谱仪进行测试,以$CDCL_3$为溶剂,以四甲基硅烷(TMS)为内标。

1.5.2 凝胶渗透色谱(GPC)分析:采用美国Waters Breeze 515型凝胶渗透色谱仪检测,以四氢呋喃为溶剂,流速为1.0 mL/min;聚苯乙烯用作标准样品,柱温和检测温度均为35 ℃。

1.5.3 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析:采用美国Nicolet Avatar 370型傅里叶变换红外光谱仪,将液晶聚合物熔融压片后,采用反射法进行测试,扫描测试的范围为500 ~ 4000 cm^{-1}。

1.5.4 广角X射线衍射(XRD)分析:采用日本理学D/MAX 2500 PC的广角X射线衍射仪测试样品的晶型。Cu Kα辐射(λ=0.154056 nm),电压40 kV,电流100 mA,扫描范围2° ~ 50°,扫描速率2 (°)/min。

1.5.5 差示扫描量热分析(DSC):采用采用美国Perkin Elmer Diamond型差示扫描量热仪,氮气气氛,样品先以50 ℃/min的速率升温到120 ℃,以消除材料的热历史,再以10 ℃/min的速率降温到−50 ℃,恒温3 min,随后以10 ℃/min的速率升温到120 ℃。记录降温和第2次升温过程的曲线。

1.5.6 溶胶、凝胶含量测试:取质量外形相近的LCEs样品,每种LCE样品设置3组平行试样,编号并称量其原始质量m_0,而m_1为LCE样品于氯仿中溶胀24 h后的质量,m_2为干燥后的质量。溶胶含量(*Sol*)和凝胶含量(*Gel*)通过式(1)和式(2)计算

$$Sol = \frac{m_1}{m_0} \tag{1}$$

$$Gel = \frac{m_2}{m_0} \tag{2}$$

1.5.7 可逆致动度测试:将制备得到的衣康酸含量不同的LCEs样条在其各自T_{Iso}和T_{Sm}平衡5 min,测得长度分别为L_{Iso}和L_{Sm},并且于2个温度点之间每隔2 ℃测量实时温度的样条长度L,可逆致动度(*RAD*)通过式(3)计算

$$RAD = \frac{L_{Sm} - L_{Iso}}{L_{Iso}} \tag{3}$$

2 结果与讨论

2.1 液晶聚合物LCPs的结构表征

Fig.3为LCP20的^{1}H-NMR谱图,溶剂为氘代氯仿。δ3.3 ~ 2.5处的2个裂峰代表了—CH_2—COO—上的H(h和h');δ7.5和7.0处的2个峰分别是联苯Ar-Ar处的H(a和b),氢的化学位移均能找到其归属,符合分子结构特征。

对LCP样品进行红外分析,结果如Fig.4所示,红外光谱显示在1164 cm^{-1}出现了C—O的伸缩振动峰,1725 cm^{-1}出现了C=O的伸缩振动峰,这验证了酯键的形成,表明几种单体缩聚成功。在1644 cm^{-1}出现C=C的伸缩振动峰也表明IA被成功引入。Tab.1是LCPs的投料摩尔分数以及通过^{1}H-NMR中峰面积积分计算所得的实际摩尔分数,同时列出了几种通过GPC分析出的LCPs数均分子量及多分散系数(PDI)。在合成LCPs预聚体阶段,首先要考虑

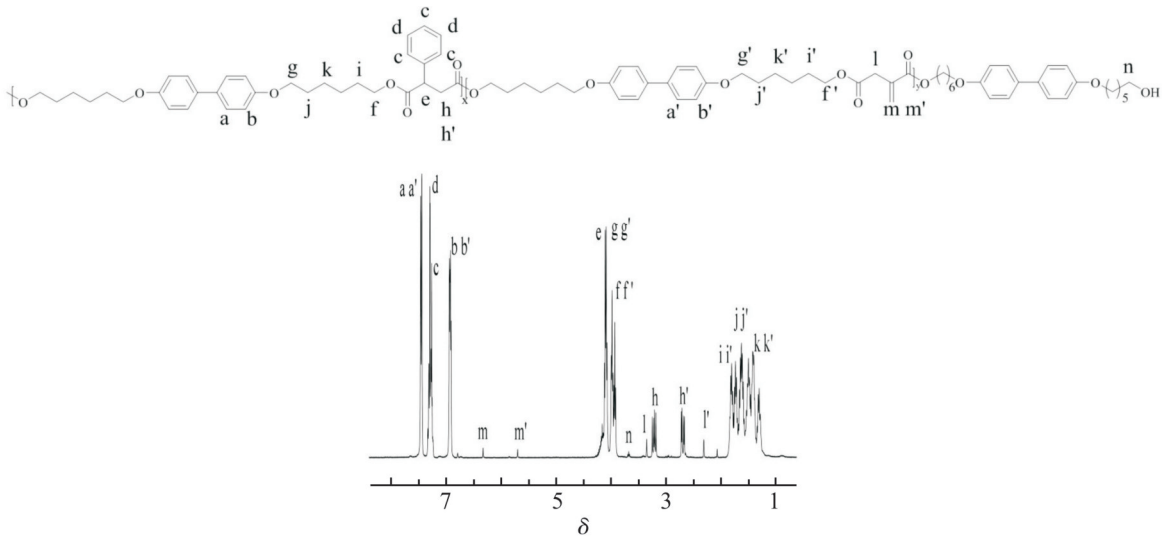


Fig. 3 ^{1}H-NMR spectrum of LCP20

的一个基本因素是衣康酸(IA)的实际含量。因为在此种液晶聚合物以往的研究中已经证实,选择PSA作为键接基团为液晶聚合物分子链中引入了大量的非对称苯环侧基,使得分子链具有独特的折叠链排列方式,苯环侧基通过错位平行堆积形成π-π相互作用,以其作为链间的物理交联点,赋予该种液晶聚合物材料更多功能的可能[16]。所以在原有配方中替换部分PSA为IA将减少物理交联点的"数量"(减弱这种分子间作用力)。而每一个接入的IA分子结构中所含的C=C都是后期光交联过程中的潜在反应点,其实际引入数量关联交联密度及交联度从而影响材料最终整体的可逆致动度。所以选择在投料中控制逐渐增加IA所占比例,但仍只占二元酸类原料中的10%~30%。从Tab.1中可以看出,IA的实际摩尔占比与投料比相比稍低,观察发现两者误差具有一定的规律性。随着IA占比逐渐增加,实际占比与投料误差越大。同时可以观察到当IA摩尔占比达到30%时,其M_n明显降低且PDI增大,表明当IA添加量过大时,会影响缩聚效果。

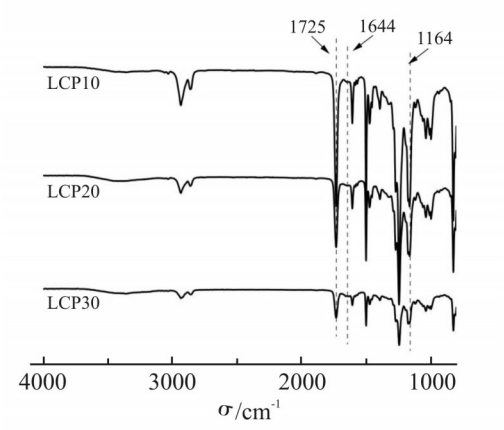


Fig. 4 FT-IR spectra of LCPs

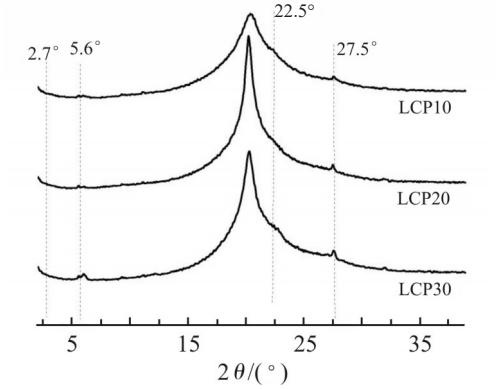


Fig. 5 WAXD patterns of LCPs

2.2 液晶聚合物LCPs的相变和液晶行为

采用广角X射线衍射仪对液晶聚合物相结构进行了表征,如Fig.5所示。小角区域位于2.7°(d=3.2 nm)出现了一些非常微弱的信号,结合在5.6°(d=1.6 nm)处出现的较为尖锐的散射峰,通过计算q值($q=4\pi\sin\theta/\lambda$),计算得出二者的q值比为1∶2,这证明了本实验所合成一系列LCPs形成近晶相,表现出长程层间有序性。在课题组之前已经发表的文章中已经证明了以BHHBP作为液晶基元,在引入不同体积键接基团后会出现多个液晶相变过程[15]。结合Fig.6中的信息,认为在升温过程中较低温度出现的吸热峰,对应近晶B层内出现取向有序的准六方密堆积排列在温度升高时转变为近晶A相,而较高

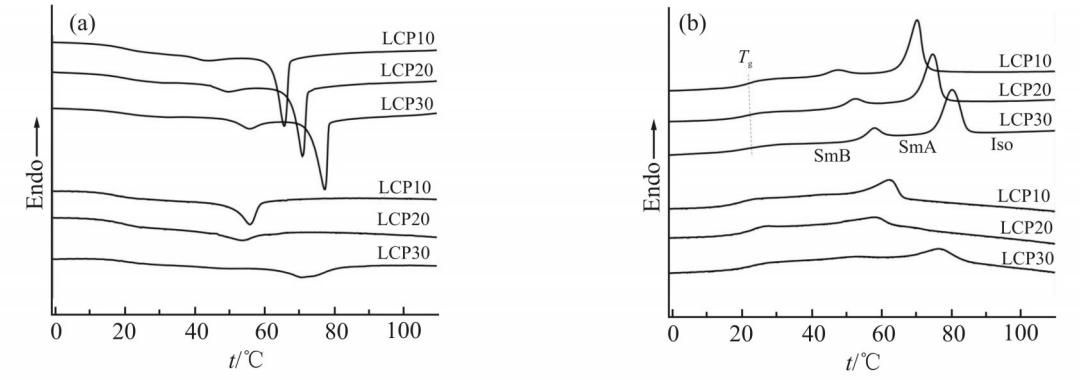


Fig. 6 (a) The first cooling (b) and the second heating DSC scan curves of the LCPs and LCEs

Tab. 2 Phase transition temperature and thermal enthalpy for the LCPs and LCEs

Sample	1st cooling scan				2nd heating scan				
	T_{SmA-B}/℃	ΔH_{SmA-B} /(J·g^{-1})	T_{ISm}/℃	ΔH_{ISm} /(J·g^{-1})	T_g/℃	T_{SmB-A}/℃	ΔH_{SmB-A} /(J·g^{-1})	T_{SmI}/℃	ΔH_{SmI} /(J·g^{-1})
LCP10	43.2	-1.43	66.0	-12.00	21.2	47.3	1.69	70.4	11.17
LCP20	49.7	-2.07	71.1	-11.00	21.7	52.6	2.17	74.9	11.61
LCP30	55.7	-2.48	77.6	-11.31	21.9	58.1	3.03	80.6	12.12
LCE10			56.0	-6.68	19.5			62.9	3.98
LCE20			53.6	-3.34	22.3			58.6	2.53
LCE30			71.0	-5.57	22.1			76.8	4.84

温度出现吸热峰主要是无序化的过程对应近晶A向各向同性态的转变。在广角区域(2θ≈20.6°及2θ≈22.5°)有2个衍射峰,对应层间的有序结构。27.6°处为PSA侧基苯环间错位平行堆积衍射峰,这也佐证了该LCPs的折叠链式构型。

Fig.6为液晶聚合物及其交联产物的DSC第1次降温曲线和第2次升温曲线。温度转变值和热焓记录在Tab.2中。LCPs在降温过程中出现了2个峰,按顺序先后形成各向同性相(Iso)、近晶A相(SmA)和近晶B相(SmB),升温过程类似。并且观察到热流曲线在T≈20 ℃时出现基线的整体提升,这对应聚合物材料的玻璃化转变温度(T_g)。LCPs配方中的液晶基元种类和添加量都相同,其最终结构差异成因主要源于键接基团(PSA和IA)的添加量。2种二元酸接入大分子链中作为连接刚性基团的枢纽,其中PSA所带有的侧基苯环作为一种非极性基团,其存在数量越多时,聚合物表现出液晶行为的相转变温度会有一定程度的往低温方向偏移。随着IA含量逐渐增加,LCPs的液晶相转变温度有升高的趋势。而对于LCEs样品组,无论是升温过程还是降温过程中出现峰的峰型和同组其他两者差别较大,LCE10的峰型较尖锐且完整,弥散度低。同时结合Fig.7,分析原因是LCE10的交联度偏低(≈20%),未形成相对完善的交联网络构型,材料内部仍有很大一部分结构接近于液晶聚合物预聚体LCP10。所以其峰值及峰型与剩余样品有着较大差异且规律性较低。

2.3 液晶聚合物LCPs的光交联行为

通过多组不同引发时间(0~60 min)的平行对照实验,发现LCPs在光引发剂819的存在下,通过近45 min的紫外光引发,交联度均可达到阈值,如Fig.7(a)所示。为确保样品充分交联,后续实验选择60 min作为LCEs光引发时间。同时结合曲线斜率变化,观察到LCEs在光引发前期,其交联度以一个很高的速率达到一定值,并且这个规律随着IA添加量的增加愈加明显。因为当均匀分散在LCP体系中的光引发剂受到紫外光照射,自身裂解产生的自由基会引发周围的双键反应,在这个过程中又会产生新的双键自由基,再与其周围双键反应,而IA含量越大潜在的反应点也越多,材料内部一定区域内

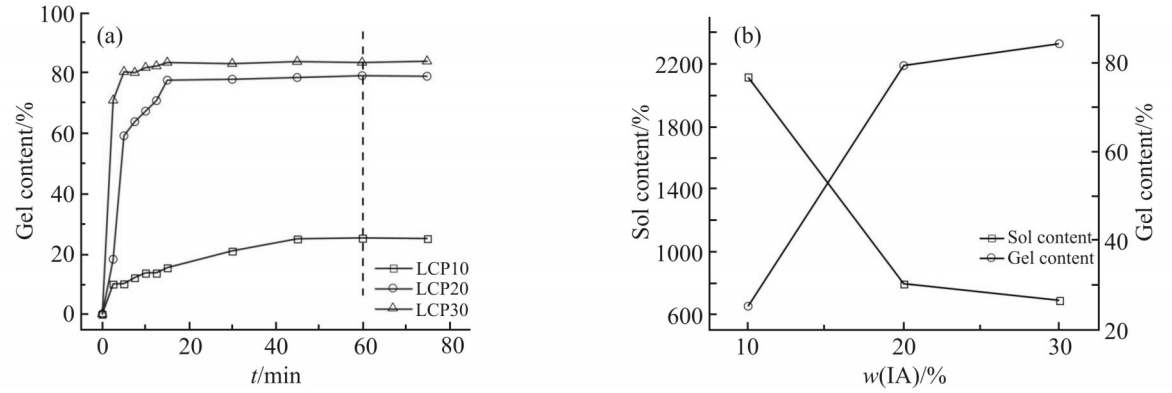


Fig. 7 (a) Gel content of LCES with different crosslinking time; (b) sol-gel content of LCEs at 60 min

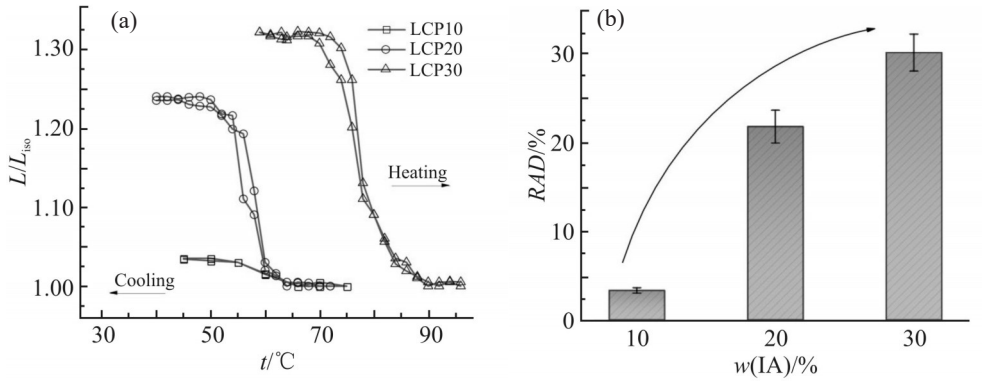


Fig. 8 (a) Shape change L/L_{iso} of LCEs along the stretching direction during heating and cooling cycles; (b) reversible actuating degrees (*RAD*) of LCEs

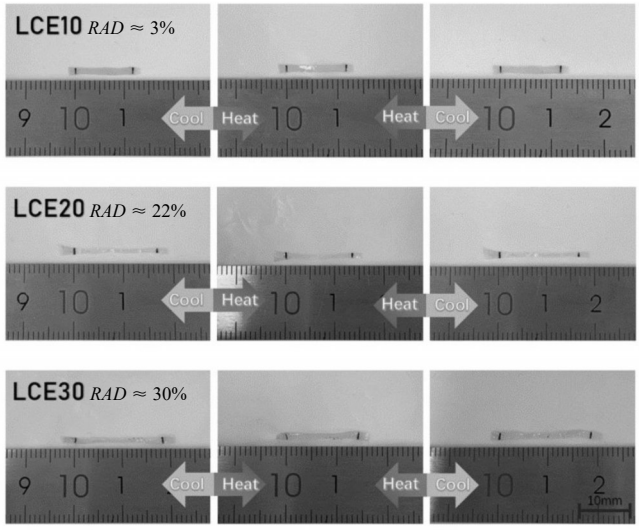


Fig. 9 Photos showing the reversible shrinkage and expansion along the stretching direction of the LCEs actuators upon heating and cooling

发生上述行为的条件越有有利,遂在短时间之内LCE30样品的交联度即可达到一个偏高的数值且与其阈值十分接近。上述自由基引发过程具有累加效应特征,最终表现为在一定时间的外界光源引发后,各个样品的交联度均达到其阈值。为了深入研究和确定IA的含量对单畴LCEs交联密度的影响,通过溶胶含量(*Sol*)和凝胶含量(*Gel*)测试来探究。Fig.7(b)为LCEs紫外引发60 min的溶胶含量和凝胶含量的对比。溶胶含量随着IA添加量的增加而减小,凝胶含量有一个明显的上升。这是因为随着样品中IA的添加量逐步增加,材料中交联点的数量也随之变多,交联密度增大,交联网络也更加密集,使LCEs在溶剂的溶胀发展受限,最终导致溶胶含量减小的同时凝胶含量增大。

2.4　液晶弹性体LCEs的形状记忆行为

将制备得到的单畴LCEs加热到各向同性相时收缩并且在冷却到液晶相后伸长,重复上述过程中出现的可逆形状记忆行为定义为可逆致动度(*RAD*)。先将样条置于70 ℃(以LCE20为例)的热台上平衡5 min,记录样条长度(L_{Iso}),随后缓慢降温至40 ℃再升温至70 ℃,每隔2 ℃记录1次实时样条长度(L)。

Fig.8(a)为单畴LCEs沿取向方向伸展和收缩的形变(L/L_{Iso})与温度的变化关系。以LCE20为例,从70 ℃冷却到64 ℃时,L/L_{Iso}数值几乎处于一个固定值且趋于稳定,而当温度下降到60 ℃,L/L_{Iso}则增加至1.02,这是因为LCE20在60~64 ℃这个温度区间已经开始发生各向同性-近晶相的转变,所以对应的曲线不再是一个平台,并且观察到该过程曲线切线的斜率逐渐增加。继续下降到56 ℃时,液晶相转变过程近乎完成,L/L_{Iso}迅速增加至1.2。同理,曲线在后续降温至40 ℃过程中切线斜率先逐渐减小后平稳趋于稳定。以上单畴LCEs出现的这种热致可逆形状记忆的温度范围与之前热性能相关测试结果近似。并且在后续多次重复冷却/加热循环期间都能观察到这种可逆的伸长和收缩现象,计算其平均可逆致动度和偏差如Fig.8(b),随着IA添加量的增加,所形成的愈加完善的交联网络构型将表现出更优异的可逆形状记忆效应。可逆致动的数码图像如Fig.9所示,可以更加直观地看到,单畴LCEs在循环升温和降温的条件下,可逆致动幅度随着IA含量的增加从3%上升至30%。

3　结论

通过熔融缩聚法,成功合成了一系列含有侧基为乙烯基的联苯液晶共聚酯。其玻璃化转变温度在室温附近,随着共聚酯中衣康酸含量的增加,液晶共聚酯的玻璃化转变温度和液晶近晶相-各向同性态相转变温度分别从21.2 ℃和70.4 ℃上升到了21.9 ℃和80.6 ℃。然后采用“两步法”进一步制备了一系列液晶弹性体。通过相关测试研究了衣康酸含量、交联时间和交联密度对其热致双向形状记忆效应的影响。结果显示,衣康酸含量越高,潜在的反应点越多,当衣康酸含量达到30%时,液晶聚酯能在短时间之内通过紫外光引发形成一个较为完善的交联构型,并获得可观的可逆致动度。本文合成的联苯热致液晶弹性体具有制备简单、室温响应等特点,可为软质致动器制造提供新的思路。

参考文献:

[1] Xia Y L, He Y, Zhang F H, *et al*. A review of shape memory polymers and composites: mechanisms, materials, and applications [J]. Advanced Materials, 2021, 33: 2000713.

[2] Wang K J, Jia Y G, Zhao C Z, *et al*. Multiple and two-way reversible shape memory polymers: design strategies and applications [J]. Progress in Materials Science, 2019, 105: 100572.

[3] Xiao Y Y, Jiang Z C, Tong X, *et al*. Biomimetic locomotion of electrically powered “Janus” soft robots using a liquid crystal polymer [J]. Advanced Materials, 2019, 31: 1903452.

[4] Yang Q, Peng C, Ren J T, *et al*. A near-infrared photoactuator based on shape memory semicrystalline polymers toward light-fueled crane, grasper, and walker [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7: 1900784.

[5] De Gennes P G, Prost J. The physics of liquid crystals [M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.

[6] Küpfer J, Finkelmann H. Nematic liquid single crystal elastomers [J]. Die Makromolekulare Chemie, Rapid Communications, 1991, 12: 717-726.

[7] Li C S, Liu Y, Lo C W, *et al*. Reversible white-light actuation of carbon nanotube incorporated liquid crystalline elastomer nanocomposites [J]. Soft Matter, 2011, 7: 7511-7516.

[8] Wei J, Yu Y L. Photodeformable polymer gels and crosslinked

liquid-crystalline polymers [J]. Soft Matter, 2012, 8: 8050-8059.

[9] Pei Z Q, Yang Y, Chen Q M, *et al*. Mouldable liquid-crystalline elastomer actuators with exchangeable covalent bonds [J]. Nature Materials, 2014, 13: 36-41.

[10] Lu X, Guo S, Tong X, *et al*. Tunable photocontrolled motions using stored strain energy in malleable azobenzene liquid crystalline polymer actuators [J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1606467.

[11] Li H, Yang R, Peng Y T, *et al*. Preparation of liquid crystalline polymer networks containing a cinnamyl group in the main chain with tunable thermal actuation behavior [J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2019, 57: 904-911.

[12] Klement T, Büchs J. Itaconic acid-a biotechnological process in change [J]. Bioresource Technology, 2013, 135: 422-431.

[13] Hirano T, Takeyoshi R, Seno M, *et al*. Chain-transfer reaction in the radical polymerization of di - n - butyl itaconate at high temperatures [J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2002, 40: 2415-2426.

[14] Kumar S, Krishnan S, Samal S K, *et al*. Itaconic acid used as a versatile building block for the synthesis of renewable resource-based resins and polyesters for future prospective: a review [J]. Polymer International, 2017, 66: 1349-1363.

[15] Yang R, Chen L, Ruan C, *et al*. Chain folding in main-chain liquid crystalline polyesters: from π – π stacking toward shape memory [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2: 6155-6164.

[16] Yang R, Zhao Y. Non-uniform optical inscription of actuation domains in a liquid crystal polymer of uniaxial orientation: an approach to complex and programmable shape changes [J]. Angewandte Chemie, 2017, 129: 14390-14394.

Preparation and Properties of Reversible Shape Memory Itaconic-Acid-Based Liquid Crystal Elastomers

Qixun Wang, Xuan Wang, Rong Yang, Jinchun Li

(*Jiangsu Key Laboratory of Environmentally Friendly Polymeric Materials*, *School of Materials Science and Engineering*, *Changzhou University*, *Changzhou 213164, China*)

ABSTRACT: A series of biphenyl liquid crystalline copolyesters (LCPs) containing methylene groups with different itaconic acid (IA) contents were synthesized with IA, phenyl succinic acid (PSA) and 4,4'-bis(6-hydroxyhexyloxy) biphenyl (BHHBP) by random copolymerization. The biphenyl liquid crystal elastomer (LCEs) with single domain orientation was prepared by stretching orientation at liquid crystal transition temperature and then crosslinking induced by UV irradiation. The effects of the content of photocrosslinked monomer on the phase transition behavior of LCPs and the thermally induced reversible driving of LCEs were studied. The results show that with the introduction of IA, LCPs still shows long-range interlayer order, that is, smectic structure is retained, and the smectic-isotropic phase transition temperature is increased. When the addition of IA reaches 30%, the liquid crystal phase transition temperature also increases from 70.4 ℃ to 80.6 ℃. In addition, it is found that when the introduction of IA reaches a certain amount, the material can obtain a more complete cross-linking network configuration, and it will also be endowed with a considerable degree of reversible shape excitation.

Keywords: reversible shape memory; itaconic acid; liquid crystal elastomer; reversible actuator