

文章编号:1007-2780(2018)05-0381-08

聚氧乙烯脱水山梨醇单油酸酯对聚合物网络 液晶电光特性的影响

牧启辉, 郭玉强, 高 亮, 马红梅, 朱吉亮, 孙玉宝*

(河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要: 聚合物网络液晶一般较大的阈值电压和饱和电压, 有明显的迟滞效应, 所以降低阈值电压与饱和电压, 降低迟滞效应和增加对比度是研究的主要目标。表面活性剂的使用可以有效减小聚合物网络与液晶的相互作用, 从而降低聚合物网络对液晶分子的锚定能, 来达到降低阈值电压与饱和电压的效果。本文通过在聚合物网络液晶里掺入不同比例的表面活性剂(聚氧乙烯脱水山梨醇单油酸酯; TWEEN 80), 来研究表面活性剂对聚合物网络液晶电光特性的影响。实验结果表明: 在聚合物网络液晶里增加该种表面活性剂的比例达到 10 : 1 时, 阈值电压可以降低 11 倍以上, 饱和电压降低 5 倍以上, 对比度有一个大的提高, 迟滞效应也得到很大的改善。本文结果对提高 PNLC 的电光特性有重要的指导意义。

关键词: 聚合物网络液晶; 表面活性剂; 阈值电压; 饱和电压; 迟滞效应

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183305.0381

Effect of polyoxyethylene sorbitan monooleate surfactant on polymer-network liquid crystal display

MU Qi-hui, GUO Yu-qiang, GAO Liang, MA Hong-mei, ZHU Ji-liang, SUN Yu-bao*

(Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to reduce the high threshold and saturation voltage, obvious hysteresis effect and increase the contrast ratio of Polymer Network Liquid Crystal (PNLC), the surfactants are used to solve the above problems. The surfactant can reduce the interaction between the liquid crystal and polymer network. As a result, the anchoring energy of the polymer network is reduced, thus the lower threshold and saturation voltage of PNLC can be obtained. In this study, the different mass fractions of surfactant (Polyoxyethylene Sorbitan Monooleate; TWEEN 80) were added into PNLC, and the electro-optical properties of PNLC were investigated. The experimental results show that if the mass fraction of PNLC and surfactant is 10 : 1, the threshold voltage can be reduced by more than 11 times, and the saturation voltage is reduced by more than 5 times. Moreover, the contrast ratio is ob-

收稿日期: 2017-11-15; **修订日期:** 2018-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61475042, No.11304074, No.11274088); 河北省自然科学基金 (No. A2015202320, No.GCC2014048)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.11304074, No.61475042, No.11274088) and of Hebei Province (No.A2015202320, No.GCC2014048)

* 通信联系人, E-mail: sun_yubao@163.com

viously improved, and the hysteresis effect is ameliorated as well. This work has an important guiding significance for the study to improve the electro-optical properties of PNLC devices.

Key words: polymer-network liquid crystal; surfactant; threshold voltage; saturation voltage; hysteresis effect

1 引言

近年来,液晶与聚合物复合材料,包括聚合物分散液晶和聚合物稳定液晶,因为具有很快的响应速度和较大的相位调制特性,从而在新型电光器件方面获得较大的应用和发展^[1-2],包括平板显示器^[3-5],光通讯设备^[6-7],电控可切换光栅^[8],空间光调制器^[9,10],波前校正自适应光学^[11-12]等。聚合物网络液晶(PNLC: Polymer Network Liquid Crystal)由于具有较低的驱动电压和较低的视角依赖性等特性,所以倍受关注。

PNLC 中液晶分布在聚合物三维网络中,液晶被弯曲的母体聚合物壁包围,被隔开的液晶通道间的向列相指向矢具有不连续性,聚合物和液晶的非寻常光折射率不一致,从而导致光学界面的产生,所以对入射光有很强的散射效应,在导通状态时具有介电各向异性为正的液晶分子受电场扭矩作用,其指向矢转到平行于电场方向,另外聚合物的折射率与液晶的寻常光折射率相近,所以此时聚合物网络液晶成透明态^[13-14]。这种器件具有不需要偏光片,制备简单等优点。

为了获得较小的驱动电压和迟滞效应,我们前辈做了很多努力。Zhang S N 等人研究不同单体配比对 PNLC 电光性能的影响,发现聚合物网络由取向排列的纤维状结构向疏松不规整的交联状结构转变形成的聚合物网络对液晶分子的锚定作用减弱,饱和电压降低^[15],但对比度很低;Lee Y H 等人研究在通过将大约 1% 的丙烯酸十二烷基酯(C12A)掺杂到液晶与单体混合物中,迟滞效应现象和残留双折射几乎完全消失,但驱动电压

高达 60 V(即便使用的液晶材料的介电各向异性高达 86)^[9];彭海炎等研究了不同醇对聚合物分散液晶电光特性的影响,研究表明引入醇分子显著加快了丙烯酸酯和液晶复合体系的光聚合反应速率,其中以正丁醇体系最为明显,且随着醇分子烷基链的增长,体系转化率降低,但依然高于不含醇的体系,醇分子的引入明显降低了饱和电压和阈值电压,但对比度也随之下降^[16];张凯等研究了在聚合物分散液晶里加入不同比例的硬脂酸(SA)表面活性剂,采用聚合物诱导相分离法制备了 PDLC,并对其进行测试,研究发现 PDLC 的电光特性随着 SA 的含量的增加而改善^[17],但到一定量后电光曲线有一个折点,且阈值电压和饱和电压没有一个明显的减小,迟滞效应现象明显,影响驱动,对比度也没有好的提高,影响显示效果。

本文采用聚合物诱导相分离法制备 PNLC,并在其中添加表面活性剂聚氧乙烯脱水山梨醇单油酸酯(TWEEN 80)。实验通过调节 PNLC 与表面活性剂 TWEEN 80 的比值来研究表面活性剂对 PNLC 电光特性的影响。

2 实验

2.1 试剂

实验中我们用到的液晶是 HPC850600-100 ($n_e=1.741$, $\Delta n=0.224$, $\Delta\epsilon=11.62$, $T_{NI}=60\text{ }^\circ\text{C}$, 江苏和成新材料有限公司(589 nm, $20\text{ }^\circ\text{C}$)), 聚合物单体材料为三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)(纯度 $\geq 99\%$ Sigma-Aldrich), 光引发剂 RG184(江苏和成新材料有限公司), 表面活性剂 TWEEN 80(纯度 $\geq 99\%$ Sigma-Aldrich)它的结构式见图 1。

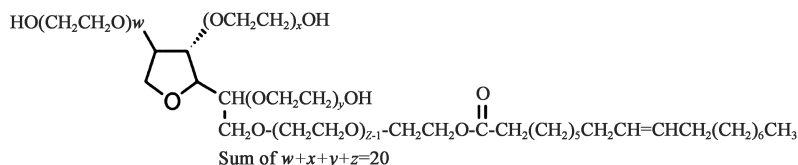


图 1 TWEEN 80 的化学结构

Fig.1 Chemical structures of TWEEN 80

2.2 聚合物网络液晶的制备

将液晶、聚合物单体 TMPTA、表面活性剂 TWEEN 80 以及光引发剂 RG184 按所需比例混合,在无紫外光加热条件下搅拌 30 min 使混合物充分均匀混合,再将混合物灌入盒厚为 20 μm 和 10 μm 的有聚酰亚胺无配向的液晶盒(北方液晶工程研究开发中心)在紫外光下固化 10 min。我们首先配得质量比为:LC:TMPTA:RG184 = 89.82:9.98:0.2 的材料,然后向该材料中添加不同比例的 TWEEN 80,具体配比见表 1。

表 1 试样配料配比

Tab.1 Sample ingredients ratio

样品	Ratio	PNLC/g	TWEEN 80/g
1	100:0	0.127 7	0
2	20:1	0.103 3	0.005 2
3	10:1	0.112 1	0.011 2
4	4:1	0.106 5	0.026 6
5	2:1	0.104 4	0.052 2

2.3 PNLC 的电光性能测试

测试 PNLC 的电光特性,使用 HL2 000 卤素灯(波长从 350 nm 到 1 100 nm)发射光,电压波形函数发生器(RIGOL DG4062)和高压放大器(TEGAM2350)串联到样品盒,透过样品盒的光线用光纤光谱仪收集(FX200L-RO),Morpho 3.2.6.r146 软件分析,取测试波长 632.8 nm,记录绘制 PNLC 的电光特性曲线。

3 结果与讨论

3.1 TWEEN 80 对 PNLC 阈值电压和饱和电压的影响

阈值电压,饱和电压及对比度是液晶器件的重要性能。我们知道表面活性剂的引入可以有效的减小界面锚定能^[18],这样可以有效减小驱动电压,而聚合物网络液晶的阈值电压^[19]为:

$$V_{th} = B \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\beta} e^{\frac{E_b}{K_b T}}}{T}}, \quad (1)$$

其中: T_c 为清亮点, E_b 是与活化能相关的量, B 是拟合参数。

TWEEN 80 为聚氧乙烯类非离子表面活性剂,侧链连接具有亲水特性的氧乙烯链,具有亲脂肪特性的脂肪链,所以既有强水溶性成分,又含强酯溶性成分,具有双亲基团,所以具有表面活性^[20]。聚合单体 TMPTA 是极性分子,存在亲脂肪的脂肪链;液晶分子由于其结构中具有较长的碳链结构,对亲脂性物质有较好的增溶性作用。在 PNLC 中加入 TWEEN 80,固化后,其脂肪链与液晶的亲脂肪碳氢链部分靠近并向中间聚集,存在疏水作用;外侧有亲水特性的氧乙烯链和氨基,它们与聚合单体 TMPTA 的亲脂肪部分相接触,互不相溶,具有相当平滑的接触面,这样导致聚合物网络对液晶分子的锚定能降低,所以阈值电压和饱和电压都降低。TWEEN 80 分子的脂肪链与聚合物单体 TMPTA 的脂肪链有较强的疏水作用,在紫外固化时,TWEEN 80 越多,聚合物单体 TMPTA 的扩散速度就越慢,相分离就越不彻底,形成的聚合物网络越致密,网孔小。这样通过控制表面活性剂的比例可以得到好的电光特性。

图 2 是测量 PNLC 与 TWEEN 80 不同比值样品的清亮点温度,可以看出随着 TWEEN 80 的比例增加,样品的清亮点温度线性减小,这是因为随着 TWEEN 80 的加入,其脂肪链部分与液晶分子的亲脂肪的碳氢链部分有疏水作用,从而向中间聚集,外侧的亲水基团间相互作用不强,这样导致了分子间的结合能将会降低,相变温度就降低了。结合式(1)可以得出:随着清亮点温度 T_c 的降低,PNLC 的阈值电压在降低,这也是加表面活性剂降低阈值电压的一个原因。

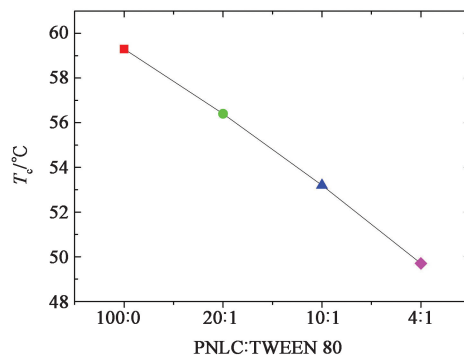


图 2 不同比例表面活性剂情况的清亮点温度

Fig.2 Clear point temperature of PNLC with different proportion of surfactant

图 3 是测量 $20\ \mu\text{m}$ 盒厚, 基质 PNLC 与表面活性剂 TWEEN 80 不同比值样品的电光特性曲线, 从图中明显可以看出, 在不加表面活性剂的 (a) 图中, 阈值电压 $50\ \text{V}$, 驱动电压高达 $172\ \text{V}$ 。

随着基质 PNLC 与表面活性剂比例增加到 $10:1$, 阈值电压最小达到 $4.5\ \text{V}$, 比没有加表面活性剂的小 11.12 倍; 饱和电压最小达到 $32\ \text{V}$, 比没加表面活性剂的小 5.37 倍。

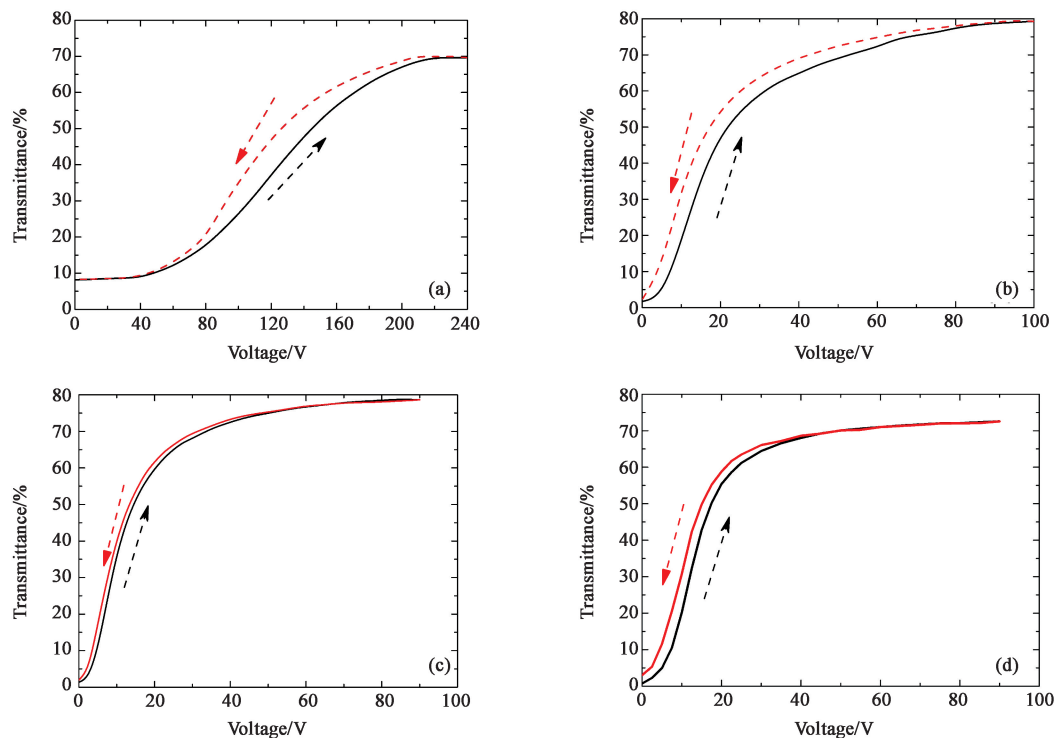


图 3 $20\ \mu\text{m}$ 盒厚在不同比例表面活性剂下的电光曲线。(a) $100:0$, (b) $20:1$, (c) $10:1$, (d) $4:1$ 。

Fig.3 Electro-optical curves of $20\ \mu\text{m}$ cell with different proportion of surfactant, (a) $100:0$, (b) $20:1$, (c) $10:1$, (d) $4:1$ 。

图 4 是测试 $10\ \mu\text{m}$ 盒的电光特性曲线, 在不加表面活性剂的情况, 阈值电压为 $28.6\ \text{V}$, 饱和电压为 $104\ \text{V}$; 加表面活性剂比例到 $10:1$, 阈值电压最低为 $1.6\ \text{V}$, 饱和电压最低为 $6.8\ \text{V}$ 。阈值电压降低了 17.75 倍, 饱和电压降低了 15 倍, 这对于器件驱动是非常重要的, 也对其它类型液晶器件有重要的作用。

图 5 和图 6 分别为测试不同盒厚, 阈值电压与饱和电压随 PNLC : TWEEN 80 不同比值的变化。从图 5 和图 6 中可以看出, 随着 TWEEN 80 比例增加, 盒厚 $20\ \mu\text{m}$ 与 $10\ \mu\text{m}$ 的不同样品阈值电压与饱和电压有相同变化趋势, 由于盒厚的影响, $10\ \mu\text{m}$ 盒的阈值电压与饱和电压整体低于 $20\ \mu\text{m}$ 盒的。在 PNLC 与 TWEEN 80 的比值为 $10:1$ 时, 阈值电压与饱和电压达到最小值, 比值为 $4:1$ 时, 阈值电压和饱和电压都有所回升, 但回升幅度不大。但依然远低于不加表面活性剂样

品的阈值电压与饱和电压。出现这些现象的原因: 开始在 PNLC 中少量加入表面活性剂, 它与液晶互溶, 在紫外固化过程中, 聚合物单体形成聚合物网络, 有表面活性剂分布于聚合物网络和液晶相的界面处, 可以减小聚合物网络和其接触的液晶分子之间的界面作用, 降低锚定能, 这样随着表面活性剂比例的增加, 阈值电压和饱和电压迅速减小。当聚合物基质 PNLC 与表面活性剂 TWEEN 80 比例达到 $4:1$ 时, 此时 TWEEN 80 在混合物中的浓度已超过表面活性剂临界浓度^[17], 多余的 TWEEN 80 在液晶内部, 因为其尺寸相比液晶分子要大, 同时对外加电场无响应, 对液晶在电场作用下的运动有阻碍作用, 所以出现阈值电压与饱和电压略微上升的现象。

图 3 (d) 和图 4 (d) 可以看出: PNLC 与 TWEEN 80 的比值为 $4:1$, 零电压处电光特性曲线上升和下降的透过率不同, 这是因为许多表面

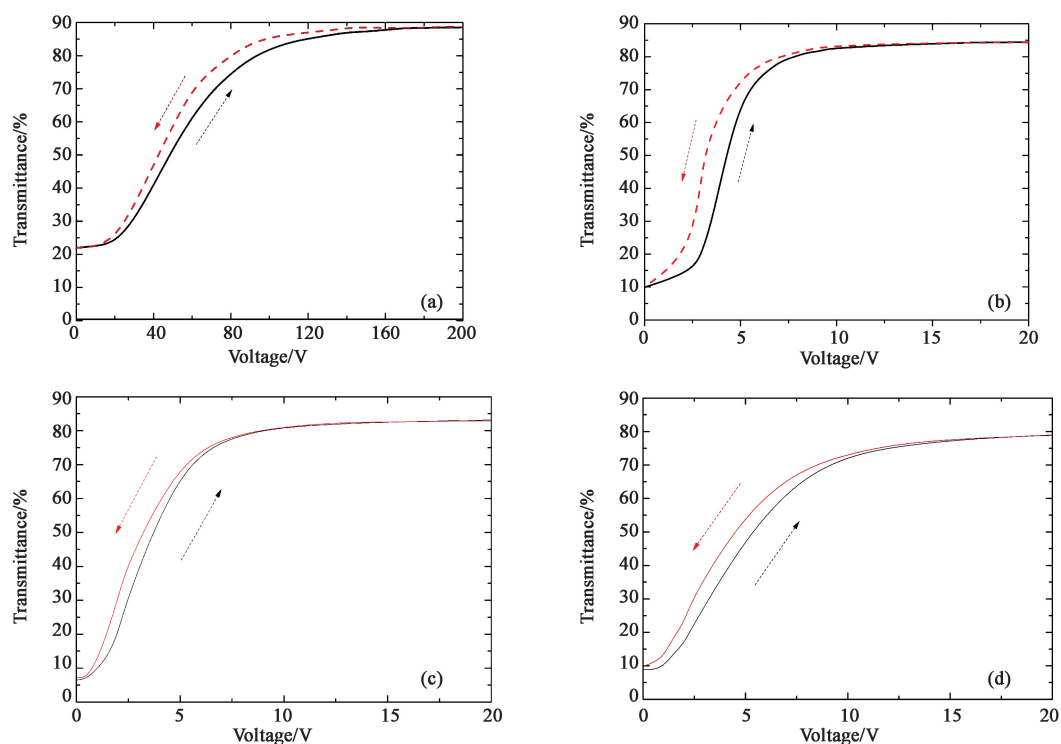


图4 10 μm 盒厚在不同比例表面活性剂下的电光曲线.(a)100 : 0, (b)20 : 1, (c)10 : 1, (d)4 : 1.

Fig.4 Electro-optical curves of the 10 μm cell with different proportion of surfactant. (a)100 : 0, (b) 20 : 1, (c) 10 : 1, (d) 4 : 1.

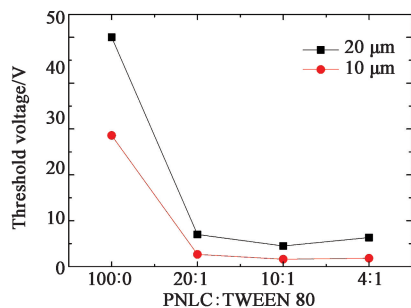


图5 阈值电压随表面活性剂比值增加的变化趋势

Fig.5 Threshold voltage for different proportion of surfactant

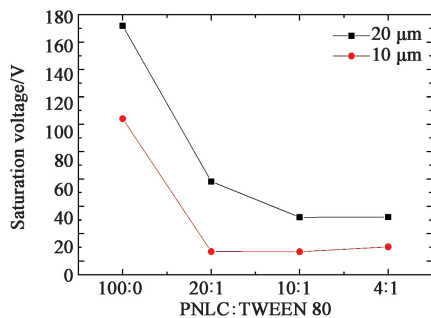


图6 饱和电压随表面活性剂比值增加的变化趋势

Fig.6 Saturation voltage for different proportion of surfactant

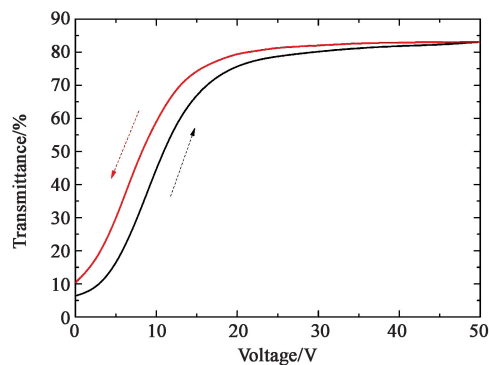


图7 PNLC : TWEEN 80=2 : 1, 20 μm 盒的电光曲线

Fig.7 Electro-optical curve of 20 μm cell with PNLC : TWEEN 80=2 : 1

活性剂分子结合成大基团,阻碍聚合物网络对液晶分子的锚定作用,大量的表面活性剂 TWEEN 80 会将液晶分子完全包裹,所以撤掉电场以后,有些液晶分子很难在短时间内回到最初的状态,或回复不彻底,这就出现了残余双折射现象;20 μm 盒比 10 μm 盒的残余双折射大,因为盒厚越厚,残余双折射越大。为了验证以上解释,我们做了样品 5,盒厚 20 μm ,PNLC : TWEEN 80 = 2 : 1,测试结果如图 7 所示。结合图 3(d)与图 7,

可以看出,表面活性剂量的进一步增大导致更加明显的残余双折射。

3.2 TWEEN 80 对 PNLC 对比度的影响

图 8 给出了 $20\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 盒对比度随表面活性剂比例增加的变化趋势。TWEEN 80 可以有效地增加 PNLC 的对比度,当 PNLC : TWEEN 80 = 10 : 1 时,对比度达到最大,分别为 60 和 13,相比无表面活性剂的对比度 8.5 和 4 提高了很多;继续增大表面活性剂的比例,对比度有所减小,但还是明显高于不加表面活性剂样品的对比度。出现这些现象的原因是:当表面活性剂较少时,聚合物网络畴间的液晶由于网络的锚定作用,导致折射率有连续变化的区间,所以散射不够强烈;随着表面活性剂的增加,液晶与聚合物网络之间的相互作用降低,增大液晶畴区之间折射率的变化,从而散射效应更大,对比度增大;当表面活性剂很多时,由图 3(d)和图 4(d)看到饱和电压时透过率降低,同时暗态透过率也稍有升高,所以对比度降低。从图 8 可以看出两种盒厚的对比度有一致的变化趋势,以 $20\ \mu\text{m}$ 盒为例来进行解释。图 9 为 $20\ \mu\text{m}$ 盒厚不同的 PNLC 与 TWEEN 80 比值样品的偏光显微镜照片,(a) 100 : 0; (b) 20 : 1; (c) 10 : 1; (d) 4 : 1。图(a)中因为没有活性剂,有连续的高透亮的区域,随着活性剂含量的增加,高透亮区域分散成更小的散射区间,这样暗态对光的散射增强。图(d)因为活性剂太多,液晶的含量较少,聚合物网络孔径进一步减小,暗态时对光的散射反而有抑制作用^[21],所以从实验中看到无电压时的透过率有轻微的上升。过多的表面活性剂对光有吸收作用,所以在饱和电压下的最大透过率降低,导致对比度降低。

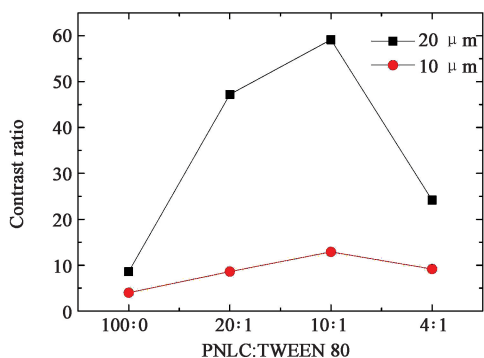


图 8 对比度随表面活性剂比例的变化

Fig.8 Contrast ratio for different proportion of surfactant

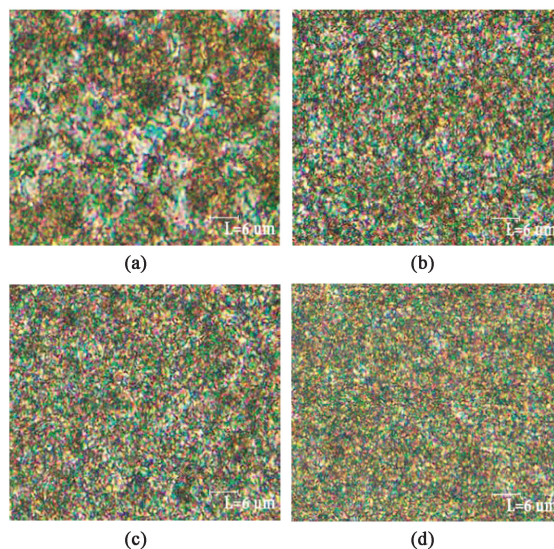


图 9 不同 PNLC 与 TWEEN 80 比值下的 PNLC 偏光显微照片.(a) 100 : 0, (b) 20 : 1, (c) 10 : 1, (d) 4 : 1.

Fig.9 POM images of PNLC with different ratios of PNLC and TWEEN 80. (a) 100 : 0, (b) 20 : 1, (c) 10 : 1, (d) 4 : 1

3.3 TWEEN 80 对 PNLC 迟滞效应的影响

图 10 展示了 $20\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 盒厚的样品中,表面活性剂 TWEEN 80 对迟滞效应的影响,从图中可以看出,随着表面活性剂的加入,样品的迟滞效应降低,当 PNLC : TWEEN 80 = 10 : 1 时,迟滞效应达到最低,迟滞降低到只有 1.01 V ($20\ \mu\text{m}$ 盒) 和 0.52 V ($10\ \mu\text{m}$ 盒);当 PNLC : TWEEN 80 = 4 : 1,迟滞效应增大,但要远小于不加 TWEEN 80 样品的迟滞效应;还可以看出薄的液晶盒对迟滞效应也有降低作用。出现这种现象的原因是:含低浓度活性剂液晶盒的驱动电压要远高于含较高浓度活性剂液晶盒的驱动电压,对于低浓度活性剂情况,液晶受到高电压作用发生排列变化,并将排列产生的弹性力传递到聚合物网络上,因此高电压作用下的聚合物网络变形严重,撤电压过程中需要更长的时间来恢复到初始状态,因此迟滞效应严重,随着活性剂的增加,液晶随电场的排列在活性剂的作用下,对聚合物网络的作用减弱,从而降低迟滞效应;但随着活性剂含量的继续增加,过量的表面活性剂会使聚合物网格中单位体积内活性剂增多,导致液晶分子被表面活性剂充分包围,当去掉电场后,被活性剂包围的液晶分子受锚定力很小,液晶分子很难在短时间恢复到原来无序的状态,这样迟滞效应会增大。

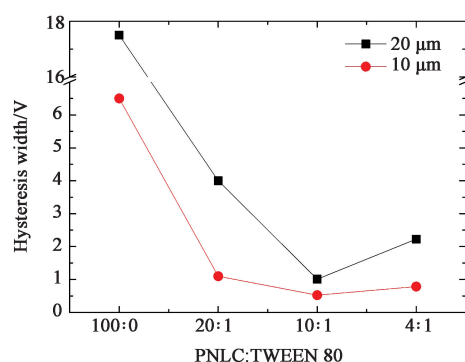


图10 迟滞效应随表面活性剂比例的变化

Fig.10 Hysteresis for different proportion of surfactant

5 结 论

聚合物网络液晶 PNLC 里添加表面活性剂

TWEEN 80 有助于降低聚合物网络与液晶分子间的界面作用力,降低锚定能从而降低 PNLC 的阈值电压和饱和电压。本研究发现随着表面活性剂 TWEEN 80 在基质 PNLC 中比例的增加,不仅阈值电压与饱和电压有一个明显的降低效果,而且对比度有一个较大的提高,迟滞效应也得到大的改善。当基质 PNLC 与表面活性剂 TWEEN 80 的比值为 10:1 左右时所呈现的效果最好,随着表面活性剂的比值增大到 4:1 时,PNLC 的电光性能有所降低,出现了较大的残余双折射,但在降低电压和提高对比度方面仍优于不加表面活性剂的样品。该论文研究结果对通过添加表面活性剂来提高聚合物网络液晶器件性能有明显的效果,对提高其它显示模式(如蓝相液晶显示器、胆甾相液晶显示器等)液晶器件性能有重要的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] 刘永智,杨开恩.液晶显示技术[M].成都:电子科技大学出版,2000:92-116.
LIU Y Z, YANG K Y. *Liquid Crystal Display Technology* [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2000: 92-116. (in Chinese)
- [2] DRZAIC P S. *Liquid Crystal Dispersions* [M]. Singapore: World Scientific, 1995: 353-423.
- [3] DRZAIC P S. Polymer dispersed nematic liquid crystal for large area displays and light valves [J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(6): 2142-2148.
- [4] HUANG C Y, FU K Y, LO K Y, et al. Bistable transfective cholesteric light shutters [J]. *Optics Express*, 2003, 11(6): 560-565.
- [5] KIM S H, CHIEN L C. Electro-optical characteristics and morphology of a bend nematic liquid crystal device having templated polymer fibrils [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(11A): 7643.
- [6] DU F, LU Y Q, REN H W, et al. Polymer-stabilized cholesteric liquid crystal for polarization-independent variable optical attenuator [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(10): 7083-7086.
- [7] LU Y Q, DU F, LIN Y H, et al. Variable optical attenuator based on polymer stabilized twisted nematic liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2004, 12(7): 1221-1227.
- [8] LEE S N, CHIEN L C, SPRUNT S. Polymer-stabilized diffraction gratings from cholesteric liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(8): 885-887.
- [9] LEE Y H, GOU F W, PENG F L, et al. Hysteresis-free and submillisecond-response polymer network liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14793-14800.
- [10] MOAGAR-POLADIAN G. Spatial light modulators based on structures containing photoelectrets and electrooptic materials: key devices for optical computing [J]. *Journal of Optical Technology*, 2004, 71(7): 478-486.
- [11] FUJISAWA T, NAKATA H, AIZAWA M. Recent development of polymer network liquid crystal displays [J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 1998, 11(2): 199-203.
- [12] LOVE G D. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(7): 1517-1520.
- [13] FUJISAWA T, NAKATA H, AIZAWA M. The behavior of anchoring transition in polymer network liquid crystal films [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 1998, 81(11): 1675-1680.
- [14] 石海兵,黄子强.低阈值电压聚合物网络液晶电光特性的研究[J].液晶与显示,2008,23(1):21-25.

- SHI H B, HUANG Z Q, Electro-optical property of low threshold polymer network liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(1): 21-25. (in Chinese)
- [15] 张珊珊, 张俊, 陆红波. 不同单体配比对聚合物网络及聚合物稳定胆甾相液晶器件光电性能的影响[J]. 液晶与显示, 2014, 29(4): 504-507.
- ZHANG S N, ZHANG J, LU H B. Influence of different monomer ratio on polymer network and photoelectric performance of polymer stabilized cholesteric liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4): 504-507. (in Chinese)
- [16] 彭海炎, 史小靖, 廖永贵, 等. 不同醇对聚合物分散液晶光聚合动力学及其电光特性的影响[J]. 高分子学报, 2012(1): 41-46.
- PENG H Y, SHI X J, LIAO Y G, *et al.* Effects of different alcohols on photopolymerization kinetics, electro-optical performances of polymer dispersed liquid crystals [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2012(1): 41-46. (in Chinese)
- [17] 张凯, 杜鑫, 李儒, 等. 表面活性剂对聚合物分散液晶光电性能的影响[J]. 液晶与显示, 2010, 25(1): 49-52.
- ZHANG K, DU X, LI R, *et al.* Effect of surfactant on electro-optical property of polymer dispersed liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2010, 25(1): 49-52. (in Chinese)
- [18] 郭福忠, 郑致刚, 宋静, 等. 表面活性剂含量对全息聚合物分散液晶光栅电光特性的影响[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1730-1733.
- GUO F Z, ZHENG Z G, SONG J, *et al.* Effect of surfactant content on electro-optical property of holographic polymer dispersed liquid-crystal gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1730-1733. (in Chinese)
- [19] PENG F L, XU D M, CHEN H W, *et al.* Low voltage polymer network liquid crystal for infrared spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2361-2368.
- [20] 李隋, 赵勇胜, 徐巍, 等. 吐温 80 对硝基苯的增溶作用和无机电解质作用机理研究[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 920-924.
- LI S, ZHAO Y S, XU W, *et al.* Solubilization of nitrobenzene in micellar solutions of Tween 80 and inorganic salts [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 920-924. (in Chinese)
- [21] FAN Y H, LIN Y H, REN H W, *et al.* Fast-response and scattering-free polymer network liquid crystals for infrared light modulators [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(8): 1233-1235.

作者简介: 牧启辉(1989—), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 从事液晶器件方面研究。E-mail: 18222902627@163.com