

doi:10.3788/gzxb20174603.0331002

用于电响应红外反射窗的液晶聚合物 薄膜特性研究

周冠清¹,袁冬¹,刘廷国¹,林显裕¹,周国富^{1,2,3},李楠²

(1 华南师范大学 华南先进光电子研究院 彩色动态电子纸显示技术研究所,广州 510006)

(2 深圳市国华光电科技有限公司,广东 深圳 518110)

(3 深圳市国华光电研究院,广东 深圳 518110)

摘 要:提出了一种红外反射器件,通过载体液晶在电场下的转向控制胆甾型液晶聚合物粒子在器件中的排布方向,实现红外反射与透射之间切换.其中,胆甾型液晶聚合物粒子是实现红外反射关键.介绍了胆甾型液晶聚合物薄膜的制备方法,并采用超声波破碎的方法制备液晶粒子.研究了液晶混合物中不同比例的交联剂液晶 1 对液晶聚合物薄膜脆性和反射波段的影响,发现当液晶 1 占 100% 时,液晶聚合物薄膜的脆性最大,且其清亮点最高,并且薄膜的反射波段随着液晶 1 比例的增加而向短波方向偏移.同时,研究了薄膜厚度对液晶聚合物粒子的影响,发现液晶薄膜厚度越小,制备的液晶聚合物粒子越小且越均匀,其制成的器件电驱动性更好.该研究有利于帮助电响应红外反射窗的性能优化.

关键词:液晶聚合物薄膜;胆甾相液晶粒子;超声波破碎法;脆性;反射率

中图分类号:O753+.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)03-0331002-8

Properties of Liquid Crystal Polymer Films for Electricity-responsive IR Reflective Windows

ZHOU Guan-qing¹,YUAN Dong¹,LIU Yan-guo¹,LIN Xian-yu¹,ZHOU Guo-fu^{1,2,3},LI Nan²

(1 Institute of Electronic Paper Displays, South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

(2 Shenzhen Guohua Optoelectronics Tech. Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518110, China)

(3 Acedemy of Shenzhen Guohua Optoelectronics, Shenzhen, Guangdong 518110, China)

Abstract: A novel infrared reflective device was proposed. The alignment direction of cholesteric liquid crystal particles in the device are driven by the diversion of host liquid crystal, which can realize the work state switch from infrared reflection to transmission. So the cholesteric liquid crystal particle is the key of this device. The preparation method of cholesteric liquid crystal polymer film was introduced, and the liquid crystal polymer particles were obtained by ultrasonic processor. The influence of different proportions crosslinker liquid crystal 1 on liquid crystal film brittleness and reflection band was studied. It was found that when the proportion of crosslinker liquid crystal 1 is 100%, the brittleness of liquid crystal film is maximum and the clear point is the highest. In addition, the reflection band of liquid crystal films is getting closer to shortwave with crosslinker liquid crystal 1 concentration increasing. At last, the influence of the liquid crystal film thickness on liquid crystal polymer particles was conducted. It was found that the size of liquid crystal polymer particles became smaller and evenner with the film thinning. This work will support the optimization of electricity-responsive infrared reflective windows

基金项目:国家自然科学基金(No. 51405166)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”(No. IRT13064)、广东省红外反射液晶高分子材料与器件国际合作基地(No. 2015B050501010)和广东省第四批引进创新科研团队(No. 2013C102)资助

第一作者:周冠清(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为电响应红外反射器件. Email:20130007009@m.scnu.edu.cn

导师(通讯作者):袁冬(1988-),女,讲师,博士,主要研究方向为响应型材料与器件. Email:yuan dong@scnu.edu.cn

收稿日期:2016-09-22; **录用日期:**2016-12-01

<http://www.photon.ac.cn>

performance.

Key words: Liquid crystal polymer films; Cholesteric liquid crystal particles; Ultrasonic crushing method; Brittleness; Reflectivity

OCIS Codes: 310.6860;160.3710;230.3720

0 引言

建筑能耗约占全社会总能耗的 1/3,是全球能源与环境危机的主要推手,主要来自于室内的温度以及光线调控.研究发现,约 45%的太阳能主要来自于波长 700~1 100 nm 之间的红外光,阳光中的红外线通过玻璃进入室内会引起环境温度的升高^[1].因此,当过多或者过少的阳光透过玻璃窗户时,就需要额外的能量来调控温度和照明,而维持室内的舒适环境正是建筑能源消耗最主要的部分^[2].当前,大部分建筑通过外部设备来降温,比如百叶窗^[3]、屋顶棚^[4]等,但是这些装置在遮挡红外线的同时也遮挡了可见光,并且造价高昂(5 000~10 000 元/平方米).如果能够在不影响可见光透射的前提下实现对红外线入射和反射的智能调控,将会节省大量的能源,因此发展具有红外透(反)射的调节功能的智能器件成为一种前景良好的节能途径^[5-6].

已有大量的文献报道了基于光^[7-9]、热^[10-11]以及光响应变色^[12-14]的材料用于调节光线强度,但是这些材料只能对可见光响应或对红外光有限调节.基于胆甾型液晶的红外反射材料制备工艺简单,在综合性能上比较突出,是制备红外反射器件的理想材料^[15].胆甾型液晶可以有选择性地、精确地控制红外反射波段,其原理是基于周期性结构的布喇格反射效应.胆甾型液晶自组织的分子螺旋结构可以有效地反射圆偏振光.胆甾型液晶螺距的手性方向决定了入射光中左旋(或右旋)光将会被全反射,这意味着光通过这种材料将会被削弱 50%的光强.胆甾型液晶螺距的大小决定了其所能反射红外线的波长范围.通过改变温度或者光强以及调节螺距的大小,可以改变反射光的波长范围.

为了更加有效地实现温度控制,需要尽可能多地反射近红外光线,由于胆甾型液晶的特性限制,单一螺距的反射光谱范围很窄,而且只能反射一种旋转方向的偏振光线^[15].为解决这一问题,各机构围绕宽波段、高反射率的液晶聚合物进行了多项研究.Hitesh 等^[15]制备了一种电响应的宽波段红外反射器件,通过聚合物网络加电后胆甾型液晶螺距的梯度分布,使得红外反射波段宽达 600 nm,但是该种红外反射器只能反射一种旋转方向的偏振光.Marshall 等^[16]制备了一种基于胆甾型液晶粒子的宽波段反射器件,其反射率达到了 80%.Petkovska 等^[17]提出了一种电响应的反射器件,该器件通过改变螺距使得器件的反射波段从深紫外延伸到远红外区域.Schenning 等^[1]也报道了一种双层的基于静态变螺距胆甾型液晶聚合物的红外线反射器.这种材料通过液晶的自组装可以达到将近 100%的红外反射率,同时保持很高的可见光透过率.然而,目前尚未有可同时实现宽波段反射、同时反射左旋和右旋偏振光及可响应的胆甾型液晶智能窗报道.

本文提出了一种全新的电响应反射器件.在该系统中,胆甾型液晶聚合物粒子是实现红外反射的关键,也是器件制备中的难点.采用超声波破碎的方法将连续的液晶聚合物薄膜破碎成碎片的方式进行粒子的制备,并针对液晶成分比例、薄膜厚度等因素对液晶聚合物粒子特性的影响展开深入研究.

1 电响应红外反射器

本文提出的红外反射器件通过载体液晶在电场下的转向控制胆甾型液晶聚合物粒子在器件中的排布方向,实现红外反射与透射之间切换.在该系统中,可以通过使用宽波段反射的液晶粒子或不同反射波段的粒子混合来实现宽波段反射;可以利用载体液晶对偏振光的旋光作用同时实现左旋和右旋偏振光的反射,通过载体液晶在电场下的转向驱动胆甾型液晶聚合物粒子在转向以实现红外反射与透射的切换,原理如图 1.在图 1(a)中,入射光进入该装置后,由于胆甾型液晶具有一定的螺旋方向,能选择性反射左旋或右旋光线的一种,即特定波长红外光线的 50%.载体液晶可以实现光线旋转方向的转变,当载体液晶与液晶聚合物粒子混合且液晶聚合物粒子在载体液晶内形成多层排布后,50%的入射红外光被液晶聚合物粒子反射,余下 50%的光线经过一段特定距离的载体液晶后,会转变其螺旋方向从而被下一个胆甾型液晶聚合物粒子反射,总体上实现红外光的 100%反射.在图 1(b)中,该装置接入电压后,能使液晶聚合物粒子转向,从而实现红外光的透射.

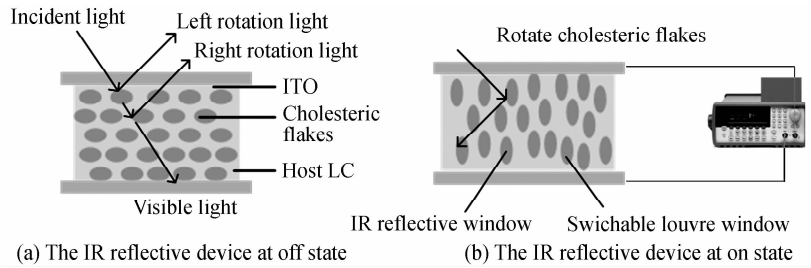


图1 基于胆甾型液晶聚合物粒子的红外反射器件原理
Fig. 1 Schematic of infrared reflective device based on cholesteric liquid crystal particles

2 实验部分

2.1 胆甾型液晶聚合物原材料

胆甾型液晶是由在液晶材料中混入手性掺杂剂形成的,并需加入阻聚剂和光诱发剂.由于需要制备液晶聚合物薄膜,因此选用带有可反应基团的液晶材料.采用的液晶材料成分如图2.

液晶1~3为可聚合的液晶材料单体,从分子式可看出,液晶1两端均为可键合的反应基团,所以在混合液晶中可以形成网状结构,而液晶2、3只有一端为反应基团,所以原则上液晶混合物中液晶1的比例越高,液晶薄膜的脆性越大.因此,可以通过改变液晶1在混合液晶中的比例来探究其对液晶混合物的清亮点以及液晶薄膜的脆性与对反射波段的影响.液晶4为手性掺杂剂,其具有手性基团,可以诱导向列相液晶形成胆甾相液晶或手性向列相液晶,诱导液晶分子形成螺旋状的排列,从而使液晶材料具有独特的光学性能^[18].液晶5为光诱发剂,可通过吸收强紫外灯光发射的紫外光,引发聚合交联和接枝反应,使液晶形成固态薄膜^[19-21].

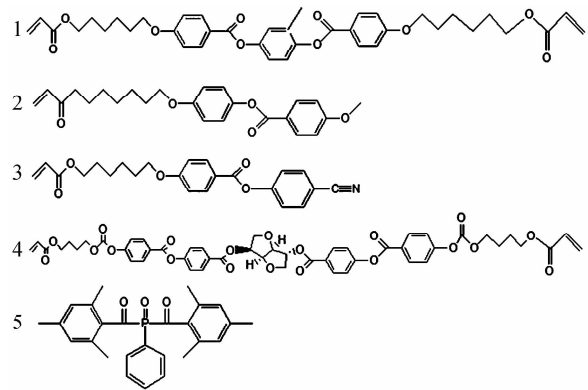


图2 液晶材料成分
Fig. 2 Material composition of liquid crystal

此外,液晶混合物中还掺杂200 ppm的阻聚剂,目的是为了通过阻聚剂分子与链自由基反应,形成非自由物质或不能引发的低活性自由基,从而防止液晶混合材料在温度较高时发生聚合^[22].

2.2 胆甾型液晶聚合物薄膜及碎片的制备

2.2.1 材料混合方法

按照表1中的比例将三种液晶材料混合,并加入3.4%的手性掺杂剂,2%的光诱发剂,200 ppm的阻聚剂,制备成五种不同比例的液晶混合物;加入二氯甲烷(DCM)溶解,并加入搅拌子置于恒温磁力搅拌器加热搅拌,使多余的DCM挥发.

2.2.2 液晶盒的制备

在玻璃基板上旋涂聚乙烯醇溶液,热固化成膜后用天鹅绒布摩擦取向,然后用混有间隔子的紫外光固化胶将两块带有取向层的玻璃基板粘接固化成液晶盒,液晶盒间隙(薄膜厚度)由间隔子的直径控制,采用 $5\mu\text{m}$ 、 $7.5\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的间隔子.

2.2.3 填充与固化

将混合液晶材料加热到清亮点以上,此时混合液晶处于各向同性液相,采用毛细吸力填充的方式进行混合液晶材料的填充,在液晶材料填满器件后,以 $1.1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降温到清亮点以下 $10\sim 20^\circ\text{C}$,此时液晶材料为手性向列相(胆甾相).然后在该温度下将混合液晶固化成聚合物,采用 $320\sim 400\text{ nm}$ 的紫外光进行液晶材料的光聚合固化,光强约为 $500\text{ mW}/\text{cm}^2$,固化时间为240 s.

表1 三种液晶材料的比例

Table 1 Proportion of three kinds of liquid crystals			
Type	Liquid crystal 1	Liquid crystal 2	Liquid crystal 3
1	20%	34.3%	45.7%
2	40%	25.7%	34.3%
3	60%	17.1%	22.9%
4	80%	8.6%	11.4%
5	100%	0%	0%

2.2.4 液晶粒子的制备

采用超声波破碎的方法,将连续的液晶聚合物薄膜破碎成液晶粒子,破碎装置如图 3(a). 采用的超声波发生装置为 Sonics VCX150PB,超声波功率为 120W. 超声波破碎过程需要在液体中进行,采用浓度为 26.47% (20℃) 的浓盐水作为液体介质,此时浓盐水的密度与液晶薄膜相接近,使液晶薄膜悬浮于浓盐水中,可保证液晶粒子的破碎更加均匀. 由于超声波破碎过程中会产生大量的热量,造成浓盐水的挥发,因此在破碎过程中需要将装有浓盐水和液晶粒子混合物的试剂瓶放置于冰水混合物中进行水冷.

为得到较小的液晶粒子,共进行 6 轮超声波破碎,每轮时间为 20 min. 连续的液晶薄膜如 3(b),薄膜破碎之后获得的液晶粒子如图 3(c).

2.3 薄膜及碎片特性测量

2.3.1 清亮点测量方法

采用差示扫描量热仪测量各混合液晶材料的相变温度,确定每一种比例液晶混合物的清亮点.

2.3.2 反射率测量方法

将液晶薄膜样品置于测试平台上,采用平行光照射测试样品,使用光谱仪 Ocean Optics 2000 测量液晶薄膜的反射光谱.

2.3.3 脆性的评价方法

随着超声波破碎次数的增加,薄膜碎片的表面积将会逐渐减小,因此采用测量其平均边长的方法来评价液晶薄膜的脆性. 具体方法为:随机选取偏光显微镜视野下的 20 块碎片,运用 Linksys32 软件测量其长及宽,记录并进行数据处理.

3 结果与讨论

3.1 液晶成分比对混合液晶清亮点的影响

液晶的清亮点指的是液晶材料由液晶态变为各向同性液态的过程中呈透明时的温度. 液晶的清亮点是液晶的重要性质,对液晶材料的应用起着关键作用^[23]. 同时,液晶的清亮点也决定着液晶的填充温度和固化温度. 实验观察得到不同比例液晶的清亮点见表 2.

由表 2 可以得到:随着液晶 1 的比例上升,液晶的清亮点也随之上升. 这是由于刚性基团会引起液晶相变温度的升高^[24],液晶 1 中有 3 个苯环连接,液晶 2 和液晶 3 则分别有 2 个苯环连接,因此,当液晶 1 的比例升高时,会引起液晶混合物清亮点升高. 当液晶 1 的比例为 100% 时,填充温度应该为 110℃ 左右,这样才能保证在各向同性状态下完成液晶的填充.

3.2 液晶成分比对薄膜反射波段的影响

由于本文所设计的红外反射器需要反射特定波段的红外线,因此为实现对反射波段的精确控制,需探究液晶成分比对薄膜反射波段的影响. 不同液晶成分比对时的薄膜反射波段如图 4,从图中可以看出,在手性掺杂剂浓度相同的情况下,反射波段随着液晶 1 比例的上升而往短波偏移.

手性掺杂剂因手性中心的存在而形成螺旋结构,将其加入到液晶混合物中,可以调节螺距 P . 然而,同一种手性掺杂剂添加到不同比例的液晶混合物体系中,其对于螺距 P 的调节情况也是不一样的,因此手性掺杂剂的浓度将影响液晶的不同反射波段. 手性掺杂剂在向列相液晶中引起螺旋的能力叫做螺旋扭曲力

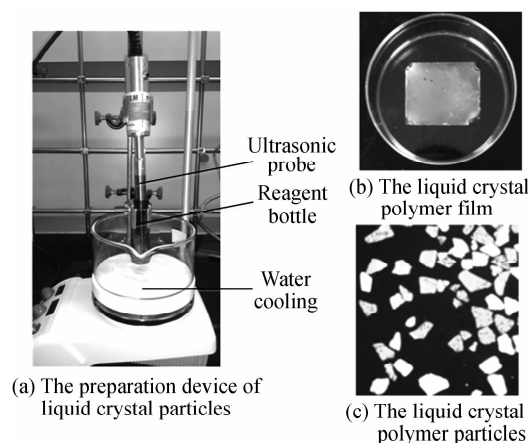


图 3 液晶粒子制备装置、薄膜以及液晶粒子
Fig. 3 Preparation device of liquid crystal particle, polymer film and polymer particles

表 2 不同比例液晶的清亮点

Table 2 Clear point of different proportions of liquid crystal

Proportion/%	Temperature/℃
20	51.2
40	64.5
60	76.8
80	92.1
100	118.0

(Helical Twisting Power, HTP). 螺距 P 的计算公式为

$$P = \frac{1}{\text{HTP} \cdot c} \quad (1)$$

式中, c 表示手性掺杂剂的浓度.

当光穿过布喇格区域时, 入射光被反射, 反射光的波段由 P 决定, 即

$$\lambda_b = \Delta n \times P \times \cos\theta \quad (2)$$

式中, λ_b 是布喇格反射的波长, Δn 是平均折射率 ($\Delta n = (n_o + n_e)/2$), n_o 和 n_e 分别表示寻常光和非寻常光的折射率, θ 为入射光与螺旋轴之间的夹角.

式(1)~(2)可简化为

$$\text{HTP} = \frac{1}{P \cdot c} \quad (3)$$

$$\frac{\lambda}{\Delta n} = P \quad (4)$$

运用已测出样品的数据以及式(3)~(4), 可以计算出手性掺杂剂加入到不同比例的液晶混合物中的 HTP 值. 选择以反射 800 nm 的红外线为目标, 根据式(3)~(4)计算出不同比例的液晶所需要的手性掺杂剂的浓度见表 3.

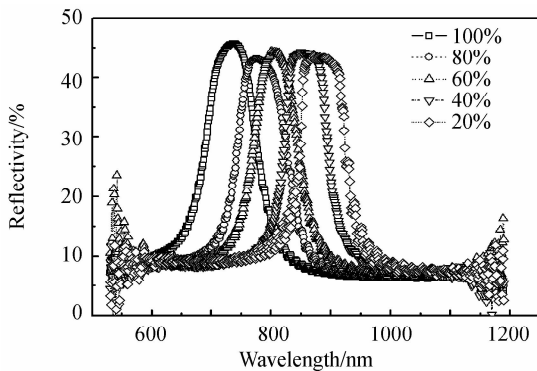


图 4 不同比例液晶薄膜的反射波段

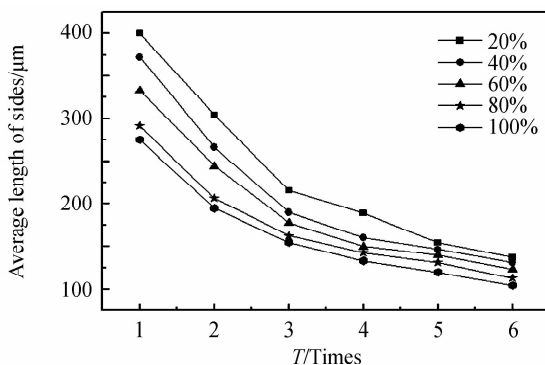
Fig. 4 Reflection band of liquid crystal films with different proportions

表 3 为得到 800 nm 反射波段所需的手性掺杂剂的浓度
Table 3 Required concentration of chiral dopant for 800 nm reflective wavelength

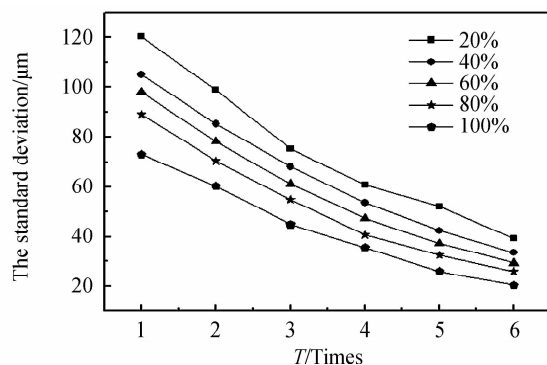
Type	Original reflective wavelength/nm	HTP/ μm^{-1}	The required concentration
20%	880	52.4	3.101%
40%	855	54.2	2.998%
60%	805	58.4	2.783%
80%	770	61.2	2.655%
100%	740	64.8	2.508%

3.3 液晶成分对比对薄膜脆性的影响

不同液晶成分对比时, 在 6 轮打碎过程中液晶粒子的平均边长变化如图 5(a). 从图中可以看出液晶 1 的比例越高, 液晶薄膜的脆性越大, 便于为制备红外反射器件提供原材料. 这是因为液晶 1 两端的基团都可以发生聚合反应如图 6, 而液晶 2 和液晶 3 只有一端带有可以发生聚合反应的基团. 当液晶 1 的比例升高时, 液晶混合物中形成的网络更复杂, 面积更广, 因此薄膜的脆性更大. 在 6 轮打碎过程中液晶粒子平均边长标准差的变化如图 5(b), 符合变化规律, 说明实验结果可靠.



(a) Mean length of sides of liquid crystal films of 6 rounds with different proportions



(b) Standard deviation of the length of sides

图 5 不同比例的液晶薄膜的破碎情况

Fig. 5 Crushing circumstance of liquid crystal films with different proportions

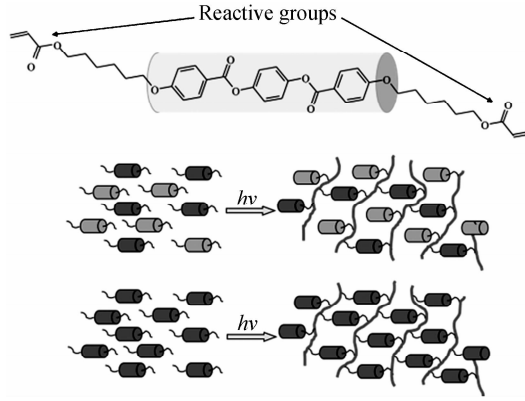


图6 液晶1的反应基团及反应机理示意图

Fig. 6 Diagram of reactive groups of liquid crystal 1 and mechanism of reaction

3.4 液晶薄膜厚度对其破碎性能的影响

由于制备的液晶薄膜粒子将用于制备电响应红外反射器,需要尺寸更小更均匀的液晶粒子,并且液晶粒子厚度越小,器件的厚度也越小,电驱动性能越好.因此,将探究液晶薄膜厚度对其破碎性能的影响.三种不同厚度的液晶薄膜的反射率如图7.从图中可以看出,液晶薄膜的反射率随厚度的下降而下降,这是因为反射率的大小与液晶薄膜厚度 d 的关系为^[25]

$$R = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi\sigma \bar{n}d}{\lambda_0}\right) \quad (5)$$

式中, $\sigma = \left[\sqrt{4\left(\frac{\lambda_0}{n \cdot P}\right)^2 + \left(\frac{n_c^2 - n_o^2}{n_c^2 + n_o^2}\right)^2} - 1 - \left(\frac{\lambda_0}{n \cdot P}\right)^2 \right]^{1/2}$, $\bar{n} = \sqrt{\frac{n_c^2 + n_o^2}{2}}$, λ_0 表示入射光的波长.

从式(5)可以看出,当液晶薄膜厚度 d 减小时,其反射率会下降.不同厚度液晶薄膜在6轮打碎过程中液晶粒子的平均边长变化如图8(a).从图中可以看出,在同一轮次,液晶薄膜越薄,液晶粒子的表面积越小.这是由于薄膜厚度变小,断裂需要的能量就越小,液晶薄膜更容易破碎成粒子.在6轮打碎过程中液晶粒子平均边长标准差的变化如图8(b),符合变化规律,说明实验结果可靠.因此,在保证液晶薄膜特性不改变的情况下,可以选择制备厚度更小的液晶薄膜,用于制备液晶粒子,从而提高红外反射器件的电驱动性.

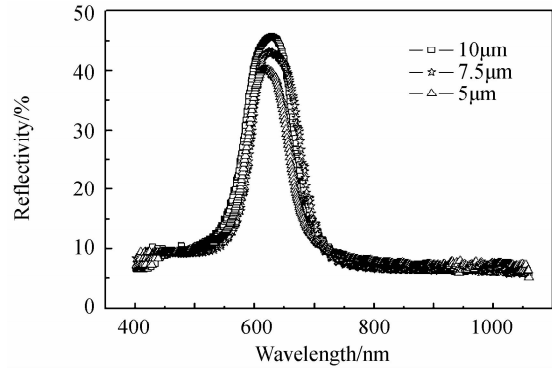
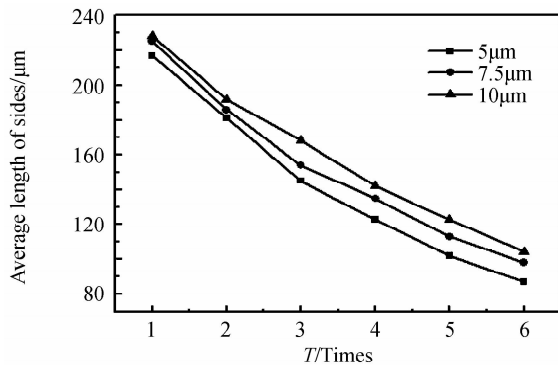
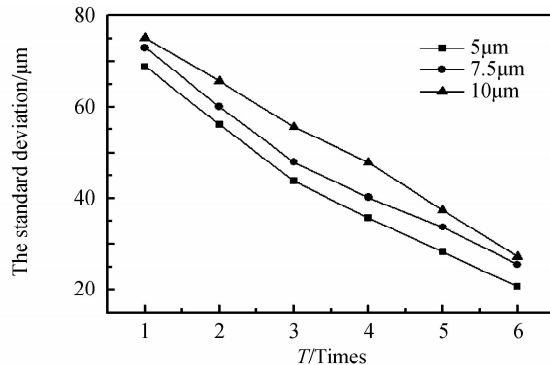


图7 不同厚度液晶薄膜的反射波段

Fig. 7 Reflection band of liquid crystal films with different gaps



(a) Average length of sides of liquid crystal films of 6 rounds with different gaps



(b) Standard deviation of length of sides

图8 不同厚度液晶薄膜的破碎情况

Fig. 8 Crushing circumstance of liquid crystal films with different gaps

4 结论

本文设计了一种红外反射(透射)器件,实现了接近100%的反射率.研究了器件中胆甾型液晶聚合物粒子的特性.通过配备不同比例的液晶混合物,考察了液晶1占20%,40%,60%,80%,100%时,液晶薄膜的反射波段以及清亮点的变化规律,使用超声波破碎的方法制备液晶粒子,观察打碎的效果,进而判定液晶1比例对液晶薄膜脆性的影响.实验结果表明,当液晶1的比例升高时,其反射波段往短波偏移且清亮点升高;当液晶1占100%时,将液晶薄膜打碎6轮之后,所获得的液晶粒子表面积是最小的,说明其脆性最大.由于液晶粒子将用于制备电响应红外反射窗,因此需要获得尺寸够小够均匀的粒子,且粒子厚度越小,器件的厚度也将越小,电驱动性能越好,研究了液晶薄膜厚度对其破碎性能的影响.实验发现当液晶薄膜厚度为5 μm 时,液晶粒子表面积最小,说明在不影响器件性能的情况下,可以选用更小厚度的液晶薄膜来制备液晶粒子.鉴于电响应红外反射窗巨大的应用前景,该研究对于制备红外反射器件具有一定的意义.

参考文献

- [1] KHANDELWAL H, LOONEN R G, HENSEN J M, *et al.* Application of broadband infrared reflector based on cholesteric liquid crystal polymer bilayer film to windows and its impact on reducing the energy consumption in buildings [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, **2**(35):14622-14627.
- [2] SHIBAEV V, BOBROVSKY A, BOIKO N. Light-responsive chiral photochromic liquid crystalline polymer systems[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology A Chemistry*, 2003, **155**(1-3):3-19.
- [3] HASHEMI A, GAGE S. Technical issues that affect the use of retrofit panel thermal shutters in commercial buildings [J]. *Building Services Engineering Research & Technology*, 2014, **35**(1):6-22.
- [4] TZEMPELIKO A, ATHENITIS A K. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand[J]. *Solar Energy*, 2007, **81**(3):369-382.
- [5] VIVIAN L, BERT H, OLAF A, *et al.* Elements that contribute to healthy building design[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2007, **115**(6):965-970.
- [6] ARIES M B C, VEITCH J A, NEWSHAM G R. Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2010, **30**(4):533-541.
- [7] CHEN X, WANG L, CHEN Y, *et al.* Broadband reflection of polymer-stabilized chiral nematic liquid crystals induced by a chiral azobenzene compound. [J]. *Chemical Communications*, 2014, **50**(6):691-4.
- [8] LI W, YU L, HE W, *et al.* Effect of a photopolymerizable monomer containing a hydrogen bond on near-infrared radiation transmittance of nematic liquid crystal/monomers composites[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2008, **112**(35):13739-13743.
- [9] LEMARCHAND P, DORAN J, NORTON B. Smart Switchable Technologies for Glazing and Photovoltaic Applications [J]. *Energy Procedia*, 2013, **57**:1878-1887.
- [10] RUNNERSTROM E L, LLORDÉS A, LOUNIS S D, *et al.* Nanostructured electrochromic smart windows: traditional materials and NIR-selective plasmonic nanocrystals. [J]. *ChemInform*, 2014, **50**(40):10555-72.
- [11] WANG J, ZHANG L, YU L, *et al.* A bi-functional device for self-powered electrochromic window and self-rechargeable transparent battery applications. [J]. *Nature Communications*, 2014, **5**:4921-4921.
- [12] SHIBAEV V, BOBROVSKY A, BOIKO N. Light-responsive chiral photochromic liquid crystalline polymer systems [J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology A Chemistry*, 2003, **155**(1-3):3-19.
- [13] BAETENS R, JELLE B P, GUSTAVSEN A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, **94**(2):87-105.
- [14] JONSSON A, ROOS A. Visual and energy performance of switchable windows with antireflection coatings[J]. *Solar Energy*, 2010, **84**(8):1370-1375.
- [15] KHANDELWAL H, LOONEN R C G M, HENSEN J L M, *et al.* Electrically switchable polymer stabilised broadband infrared reflectors and their potential as smart windows for energy saving in buildings[J]. *Scientific Reports*, 2014, **5**:11773.
- [16] MARSHALL K L, HASMAN K, LEITCH M, *et al.* 62. 3: doped multilayer polymer cholesteric-liquid-crystal (PCLC) flakes: a novel electro-optical medium for highly reflective color flexible displays[J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 2007, **38**(1):1741-1744.
- [17] PETKOSKA A T, JACOBS S D. The Manufacture, Characterization and Manipulation of Polymer Cholesteric Liquid Crystal Flakes and Their Possible Applications[J]. *Journal of Material Science and Engineering A*, 2012, **2**(2):137-151.
- [18] MA J, ZHENG Z, LIU Y, *et al.* Electro-optical properties of polymer stabilized cholesteric liquid crystal film[J].

- Chinese Physics B*, 2011, **20**(2):299-305.
- [19] LIU D, BASTIAANSEN C W M, TOONDER J M J D, *et al.* Light-induced formation of dynamic and permanent surface topologies in chiral - nematic polymer networks[J]. *Macromolecules*, 2012, **45**(19):8005-8012.
- [20] LIU D, BASTIAANSEN C W M, TOONDER J M J D, *et al.* Photo-switchable surface topologies in chiral nematic coatings[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, **51**(4):892-896.
- [21] LIU D, BROER D J. Liquid crystal polymer networks : preparation, properties, and applications of films with patterned molecular alignment[J]. *Langmuir*, 2014, **30**(45):13499-13509.
- [22] QIAO Zhen-liang, XIONG Dang-sheng, TAN Zheng. Progress in technology of homopolymerization inhibition on grafting copolymer process[J]. *New Chemical Materials*, 2007, **35**(9): 29-31.
乔振亮,熊党生,谈政. 接枝聚合中阻聚技术研究进展[J]. 化工新型材料. 2007, **35**(9):29-31.
- [23] WANG Bi-qin, DING Fu-jiang, ZHAO Ke-qing. Study of the influence of intermolecular hydrogen bonding on clear points of discotic liquid crystals by mean field theory[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2008, **66**(6): 626-632.
汪必琴,丁涪江,赵可清. 用平均场理论研究盘状液晶分子间氢键对清亮点的影响[J]. 化学学报, 2008, **66**(6):627-632.
- [24] 周群华. 含供-吸电子手性液晶聚合物及单体的合成及性能研究[D]. 沈阳:东北大学, 2008.
- [25] PRIESTLEY E B, WOJTOWICS P J, SHENG P. Introduction to liquid crystals[M]. London: Plenum Press 1974, 203-216.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 51405166), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(No. IRT13064), International Cooperation Base of Infrared Reflection Liquid Crystal Polymers and Device (No. 2015B050501010), Guangdong Innovative and Entrepreneurial Research Team Program(No. 2013C102)