

文章编号: 1007-2780(2022)10-1285-08

## 聚合度与交联对碘系 PVA 偏光膜 湿热稳定性的影响

牛宇洁<sup>1</sup>, 赵明世<sup>1</sup>, 王兆飞<sup>1</sup>, 王晨曦<sup>1</sup>, 陆红波<sup>2</sup>, 刘春华<sup>1</sup>, 张国兵<sup>2</sup>, 丁运生<sup>1\*</sup>

(1. 合肥工业大学 化学与化工学院, 先进功能材料与器件安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 光电技术研究院, 特种显示技术国家工程实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 利用流延法制备聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)偏光膜, 通过正交实验确定碘化和交联时间, 得到了不同聚合度以及交联与未交联的碘系 PVA 偏光膜。通过 UV-Vis 对湿热老化前后 PVA 偏光膜进行透过率测试和偏振度计算; 利用 Raman 和 XRD 表征了不同聚合度偏光膜的化学形态和晶体结构; 通过 FT-IR 分析湿热老化前后偏光膜的分子结构, 系统探究了聚合度与交联对偏光膜光学性能及其耐老化的影响。研究表明, 随着聚合度的增加, PVA 膜对碘离子的吸附能力变强, 偏光膜中 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 比重增加, 其耐湿热老化性变好。从偏光膜的偏振度变化来看, 聚合度越大其光学性能越好, 老化失效率越低。在相同聚合度下, 交联大幅提高了偏光膜的抗水解和耐湿热老化性能。高湿环境促进了偏光膜的解取向和交联结构中硼酯键的水解, 导致膜结构和碘离子定向排列结构的破坏。碘离子流失是偏光膜失效的主要原因。

**关键词:** 偏光膜; 聚合度; 交联; 湿热稳定性

中图分类号: TQ317.6; TN27 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2022-0129

## Effect of polymerization degree and crosslinking on hygrothermal stability of iodine-PVA polarizing films

NIU Yu-jie<sup>1</sup>, ZHAO Ming-shi<sup>1</sup>, WANG Zhao-fei<sup>1</sup>, WANG Chen-xi<sup>1</sup>, LU Hong-bo<sup>2</sup>,  
LIU Chun-hua<sup>1</sup>, ZHANG Guo-bing<sup>2</sup>, DING Yun-sheng<sup>1\*</sup>

(1. *Anhui Key Laboratory of Advanced Functional Materials and Devices, School of Chemical and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*

2. *National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Academy of Opto-Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

**Abstract:** The polyvinyl alcohol (PVA) polarizing films were prepared by the flow-casting method. The crosslinking or uncrosslinking iodine-PVA polarizing films with different polymerization degree were obtained after the determination of iodization and crosslinking time by orthogonal experiments. The transmittance was measured and the polarization degree of PVA polarizing film was calculated by using UV-Vis before and after hygrothermal aging tests. The chemical morphology and crystal structure of the polarizing films with different

收稿日期: 2022-04-16; 修订日期: 2022-05-14.

基金项目: 安徽省高校协同创新项目 (No. GXXT-2019-001)

Supported by Collaborative Innovation Project of Universities in Anhui Province (No. GXXT-2019-001)

\*通信联系人, E-mail: dingys@hfut.edu.cn

polymerization degree were characterized by using Raman and XRD. The molecular structure of the polarizing films with different polymerization degree before and after hygrothermal aging was analyzed by using FT-IR, and the effects of polymerization degree and crosslinking on the optical properties and aging resistance of the polarizing films were systematically investigated. The results show that as the polymerization degree increases, the adsorption of PVA films to iodide ions improves, the proportion of  $I_5^-$  in films increases, and the hygrothermal resistance aging performance of polarizing films becomes better as well. From the perspective of the change of polarization degree of polarizing films, the higher degree of polymerization is, the better optical performance and the lower failure rate of aging are. Under the same polymerization degree, the hydrolysis resistance and the hygrothermal resistance aging performance of the polarizing films are significantly improved after crosslinking. High humidity promotes the disorientation of polarizing films and the hydrolysis of borate ester bond in crosslinking structure, resulting in the destruction of films structure and iodide ions orientation. The iodide ions loss is the main reason for the failure of polarizing films.

**Key words:** polarizing films; polymerization degree; crosslinking; hygrothermal stability

## 1 引言

偏光片是只允许某一特定方向上的光通过的线性偏振器,是成像显示技术中特殊的光学膜器件。随着平板显示器市场的快速增长,高耐久偏光片受到越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。常用的偏光片是由聚乙烯醇(PVA)膜为主要偏光基体,聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和三醋酸纤维素(TAC)等多层光学膜复合制成。根据染色方法,偏光片可分为碘系偏光片和染料系偏光片<sup>[3-4]</sup>,其中碘系偏光片因其具有良好的透过率以及高偏振度被广泛应用于电子产品的成像显示的光学器件中,如电脑显示器、手机屏幕以及车载甚至机载大屏显示等<sup>[4]</sup>。

PVA偏光膜的光学性能与PVA分子链的立构规整性、取向、结晶、吸附碘离子的含量以及温度等因素有关<sup>[5-10]</sup>。PVA具有吸湿性,络合取向的聚碘离子容易在高温高湿环境下被破坏,造成偏振性能下降甚至丧失光学性能<sup>[11-16]</sup>,从而限制了偏光膜的应用领域。

本实验用不同聚合度的PVA作为基体制备偏光膜,研究了聚合度和交联对偏光膜光学性能的影响,并进行了湿热稳定性分析,从分子结构层面进行探究并提出偏光膜失效机理。对PVA偏光膜在高温高湿环境下稳定性的研究,尤其是从分子结构层面对其湿热稳定性以及偏光膜光学性能失效机理的探究,对于设计和开发新一代偏光膜具有重要意义。

## 2 实验

### 2.1 实验原料与制备

聚乙烯醇:PVA-1099、PVA-1799、PVA-2099、PVA-2499,安徽皖维集团;甘油、硼酸、碘、碘化钾、乙醇:分析纯,Aladdin公司。

采用流延法制备PVA基膜,将不同聚合度的PVA树脂在室温下溶胀后倒入圆底烧瓶,放入95℃的恒温水浴锅中,以500 r/min的转速进行加热溶解,搅拌2 h后溶解为胶状溶液,配制质量分数为10%的PVA水溶液,冷却至室温并进行1 h超声除泡,随后将PVA溶液浇铸到干净的平板玻璃上,放入50℃真空烘箱中保持6 h,得到表面平整和厚度均匀的PVA基膜,如图1(a)所示。

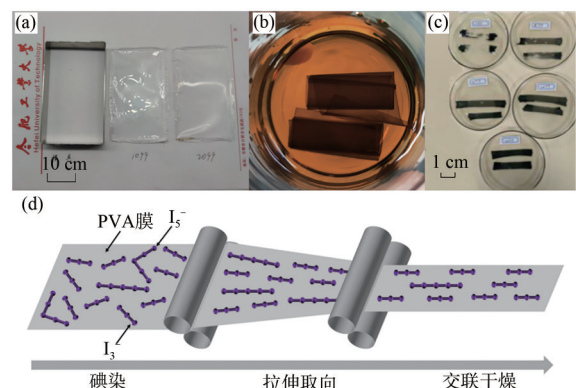


图1 (a~c)制膜、碘染、湿热老化的实物图;(d)偏光膜制备的示意图。

Fig. 1 (a~c) Digital photos of films making, iodine dyeing and hygrothermal aging; (d) Schematic diagram of polarizing films preparation.

将制备的 PVA 基膜裁剪成 80 mm × 25 mm 的长方形样条,首先浸泡于浓度为 0.01 mol/L 的碘染色液(为保证静电平衡在每升染色液中加入 0.1 mol 的 KI)中染色,在 50 °C 下碘染 1 min,如图 1(b)所示。随后放入自制拉膜机中拉伸至 4 倍长度,拉伸取向使 PVA 基膜中的碘离子定向

排列,从而使 PVA 膜具有偏光性。接着将偏光膜分为两组,其中一组放入 5%(质量分数)硼酸溶液中交联 4 min,用乙醇清洗两次后室温晾干,制得不同聚合度以及交联与未交联的 PVA 偏光膜。最后分别进行湿热老化实验,偏光膜制备示意图如图 1(d)所示,样品编号如表 1 所示。

表 1 不同聚合度与交联前后 PVA 偏光膜

Tab. 1 PVA polarizing films with different polymerization degree before and after crosslinking

聚合度	1 000	1 700	2 000	2 400
未交联	F1099	F1799	F2099	F2499
交联	CF1099	CF1799	CF2099	CF2499
未交联湿热老化	DHF1099	DHF1799	DHF2099	DHF2499
交联湿热老化	DHCF1099	DHCF1799	DHCF2099	DHCF2499

## 2.2 测试与表征

应用紫外-可见光谱仪(美国 Agilent Technologies 公司)对不同聚合度和交联前后的 PVA 偏光膜进行单片透过率( $T$ )、平行透过率( $T_{//}$ )以及直交透过率( $T_{\perp}$ )测试,测试光谱范围为 300~800 nm。采用拉曼光谱仪(法国 HORIBA Jobin Yvon 公司 LabRam HR Evolution 型),用波长为 532 nm 的激发光束测量不同聚合度偏光膜的拉曼光谱。通过 X-射线衍射仪(荷兰帕纳科公司 X-Pert PRO MPD 型)表征偏光膜的结晶性。采用傅里叶变换红外光谱仪(美国 Thermo Scientific 公司 Nicolet Nexus 6700 型)表征老化前后偏光膜的化学结构,测试范围为 4 000~500  $\text{cm}^{-1}$ 。通过恒温恒湿箱(广东爱斯佩克试验仪器公司 SETH-Z-102UJ 型)对偏光膜样品进行湿热老化实验,温度为 70 °C,湿度为 90%,老化实验每组取 3 个样品,老化时间均为 3 h,偏光膜老化实物如图 1(c)所示。

## 3 结果与讨论

### 3.1 光学性能影响

图 2 是不同聚合度的偏光膜老化前后的单片可见光透过率变化曲线。如图 2(a)和(b)所示,无论交联与否,偏光膜老化前的单片透过率都随着聚合度的增加而下降。这是由于聚合度的增加而增强了 PVA 基膜对碘离子的吸附能力,从而导致单片透过率下降<sup>[11]</sup>。而且相较于未交联

的偏光膜,交联的偏光膜单片透过率也呈下降趋势,这是由于硼酸与 PVA 分子链上羟基发生交联,从而能固定更多的碘离子,使得偏光膜颜色更深导致单片透过率下降。

如图 2(c)所示,对两组不同聚合度的偏光膜进行 3 h 的高温高湿老化实验后,未交联的偏光膜的单片透过率有了大幅提高,但依旧保持着随聚合度的增加透过率降低的趋势。高温高湿环境导致碘离子的大量流失,聚合度低的偏光膜碘离子流失更为严重,透过率的提高更加明显,如聚合度最低的 PVA 偏光膜(DHF1099)在可见光范围内透过率达到了近 80%,偏光膜失效。但交联结构束缚了碘离子的运动,有效阻止了碘离子的流失,大为改善了耐湿热老化性,如图 2(d)所示。分子量最低的偏光膜在老化 3 h 后其透过率接近 60%左右,表现出优异的耐湿热老化性。另外交联偏光膜老化后的透过率依旧随着聚合度的增加而降低,但相互之间的差距相比老化前缩小(图 2(d))。

根据紫外-可见光谱测试两片偏光膜平行和垂直时的透过率,可以计算偏振度:

$$P = [(T_{//} - T_{\perp}) / (T_{//} + T_{\perp})]^{1/2} \times 100\% \quad (1)$$

其中  $T_{//}$  为平行透过率,  $T_{\perp}$  为直交透过率。图 3(a)和(b)分别表示交联前后不同聚合度的 PVA 偏光膜偏振度变化曲线,从图中可以看出,聚合度在 1 700 以上的偏光膜在老化前后其偏振度几乎都保持在 99% 以上,表现了良好的光学性能。而 F1099 样品由于聚合度较低,吸附碘离子的能力

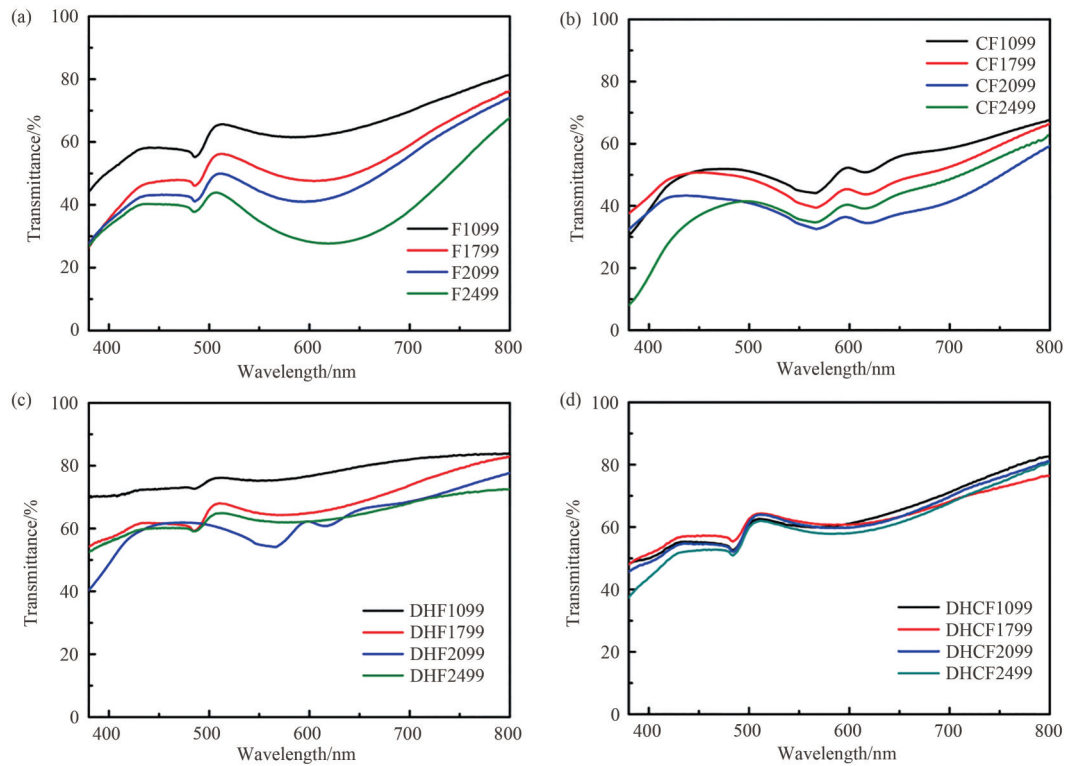


图 2 未交联(a)与交联(b)的偏光膜单片透过率;高温高湿环境下老化 3h 后未交联(c)与交联(d)的偏光膜单片透过率。

Fig. 2 Single-chip transmittance of uncrosslinking (a) and crosslinking (b) polarizing films; Single-chip transmittance of uncrosslinking (c) and crosslinking (d) polarizing films after 3 h aging in hygrothermal environment.

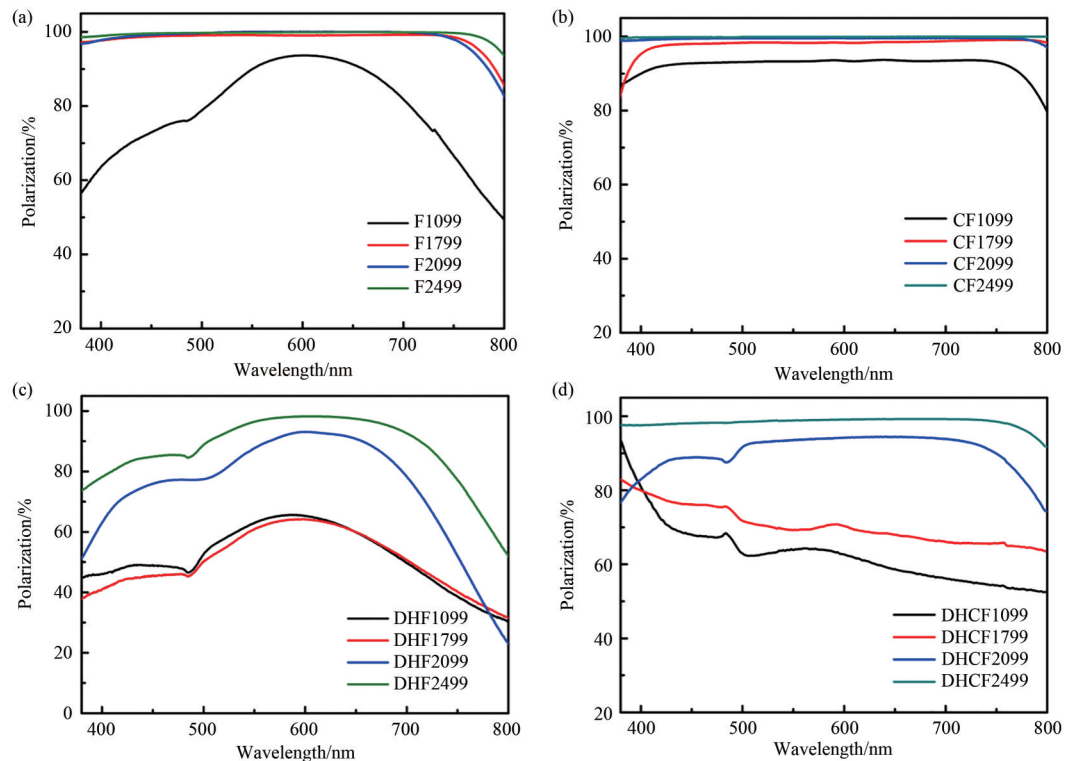


图 3 未交联(a)与交联(b)的偏光膜偏振度变化曲线;未交联(c)与交联(d)的偏光膜湿热老化后偏振度变化曲线。

Fig. 3 Changing (a) curves of polarization degree of uncrosslinking (a) and crosslinking (b) polarized films; Changing curves of polarization degree of uncrosslinking (c) and crosslinking (d) polarizing films after hygrothermal aging.

较弱,取向后可以定向排列的碘离子较少,而且在制备过程中还存在碘离子流失,导致偏振度偏低。交联可以改善低聚合度偏光膜的偏振度(图 3(b)),如偏光膜 CF1099 的偏振度比 F1099 有明显提高(图 3(a),(b)),这是因为交联可以固定吸附的碘离子,防止进一步流失。

图 3(c)和(d)分别表示交联和未交联的不同聚合度的 PVA 偏光膜老化后的偏振度变化趋势,可以看出聚合度越高,其偏振度也越高,耐湿热老化性能越强。这是由于聚合度越高的偏光膜对碘离子的吸附能力越强,使其在高温高湿老化后,碘离子依旧保持一定程度的定向分布。而且,由于交联结构对分子链的限制使碘离子在 PVA 上的固定作用增强<sup>[8]</sup>,阻碍了高温高湿环境下碘离子从偏光膜中游离出来,因此高聚合度和交联的偏光膜表现出更加优异的耐湿热老化性能。

### 3.2 拉曼分析

已有研究表明,偏光膜的偏振性取决于 PVA 基膜中定向排布的碘离子的含量和存在形式,主要的发色团为  $I_3^-$  与  $I_5^-$ ,而  $I_5^-$  相比于  $I_3^-$  对偏光膜

的偏光性能影响更大, $I_5^-$  含量越高,偏光性越好<sup>[4]</sup>。因此我们对不同聚合度的偏光膜进行拉曼分析,如图 4(a)所示,偏光膜在  $160\text{ cm}^{-1}$  和  $110\text{ cm}^{-1}$  出现吸收峰,分别对应着  $I_5^-$  和  $I_3^-$ 。随着 PVA 基膜聚合度的增加, $I_5^-$  含量增加,聚合度为 1 000 的 PVA 偏光膜(F1099)中  $I_5^-$  和  $I_3^-$  的比值为 1:1,而聚合度为 2 400 的 PVA 偏光膜(F2499)中  $I_5^-$  和  $I_3^-$  的比值达到了 5:2, $I_5^-$  含量明显增加,因此表现出更好的偏光性。

聚合度的增加使得 PVA 基膜对碘吸附能力增强,使偏光膜中碘离子含量增加。如图 4(b)所示,在偏光膜中, $I_3^-$  主要存在于 PVA 晶相中,可以进入晶格中形成相对稳定的 PVA- $I_3^-$  共晶体<sup>[4,17]</sup>,而  $I_5^-$  主要存在于 PVA 非晶相中<sup>[6]</sup>。相对来说, $I_3^-$  进入晶格需要更长的时间,因此在实际偏光膜的制作过程中,较短的碘染时间下形成的 PVA- $I_3^-$  共晶体有限,更多的是作为  $I_5^-$  存在于非晶相中<sup>[4,6,17]</sup>,因此非晶相中  $I_5^-$  含量越高其偏光膜性能越好。在湿热老化环境中,高的聚合度和交联都有利于减少碘离子的流失,使得偏光膜耐候性增强。

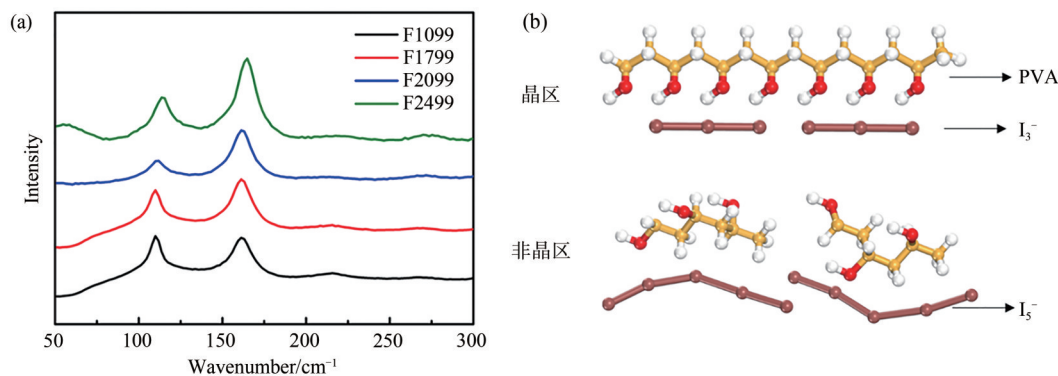


图 4 (a)不同聚合度 PVA 偏光膜的拉曼光谱;(b)碘离子在偏光膜晶格中的示意图。

Fig. 4 (a) Raman spectra of PVA polarizing films with different polymerization degree; (b) Schematic diagram of iodide ions in the lattice of polarizing films.

### 3.3 XRD 分析

由于偏光膜中  $I_5^-$  和  $I_3^-$  的比重与 PVA 聚合度有关,而  $I_5^-$  和  $I_3^-$  在 PVA 中主要分布的晶区不同,因此采用 X-射线衍射考察了不同聚合度的偏光膜在老化前后结晶性能的变化。如图 5 所示,聚合度不同的 CF1799 和 CF2499 两组样品的结晶性能没有明显区别,因此在相同工艺下,聚合度有可能主要影响的不是晶相中的

$I_3^-$ ,而是非晶相中的  $I_5^-$ 。随着聚合度增加,碘离子吸附能力增强,吸附的碘离子大多作为  $I_5^-$  存在于非晶区,因此  $I_5^-$  含量增加。与未老化样品相比,老化样品的结晶峰都明显增强(图 5),表明湿热老化改善了偏光膜的结晶性。这是由于高温高湿的老化环境,分子链段有充分的时间发生重排,使分子链排列成更加有序的聚集,改善了结晶性。

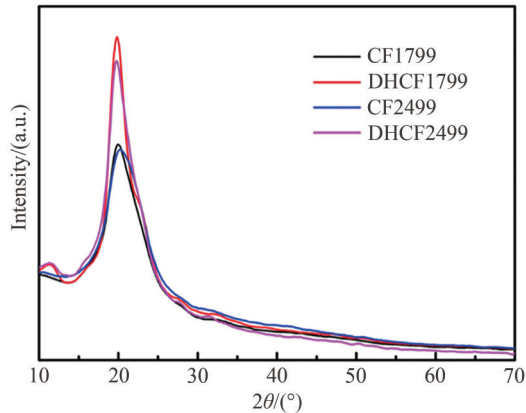


图5 不同聚合度偏光膜老化前后的XRD曲线

Fig. 5 XRD of polarizing films with different polymerization degree before and after aging.

### 3.4 FTIR 分析

通过FTIR表征了不同聚合度偏光膜老化前后的分子结构,如图6(a)所示,可以观察到不同聚合度的偏光膜在 $3325\text{ cm}^{-1}$ 处存在PVA分子间或分子内以缔合形式存在的 $\text{-OH}$ 特征峰, $2915\text{ cm}^{-1}$ 处为 $\text{C-H}$ 伸缩振动峰,并且随着聚合度增大, $\text{-OH}$ 和 $\text{C-H}$ 特征峰强度都显著增大。另外,在低波数 $660\text{ cm}^{-1}$ 处存在碘离子的特征吸收峰,并且其强度也是随着聚合度的增加而增大,这也从结构上证明了随着偏光膜聚合度的增加,其吸附碘离子的能力增强。交联的偏光片膜在 $1325\text{ cm}^{-1}$ 处有明显的 $\text{B-O}$ 振动峰,这是由于硼酸与偏光膜羟基发生交联所致,并且随着聚合度的增加, $\text{B-O}$ 振动峰更加明显。

偏光膜湿热老化后红外光谱发生了两方面的变化,如图6(b)所示,一方面是湿热老化后的偏光膜可以明显观察到 $660\text{ cm}^{-1}$ 处碘离子峰强度减弱,这是高温高湿环境下碘离子的流失所导

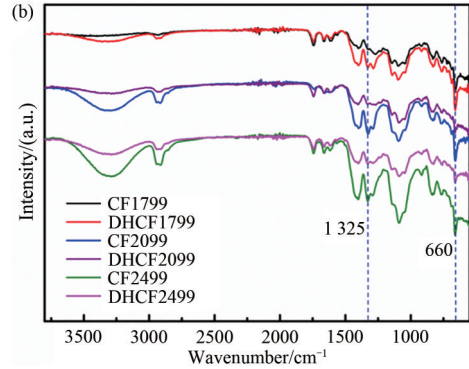
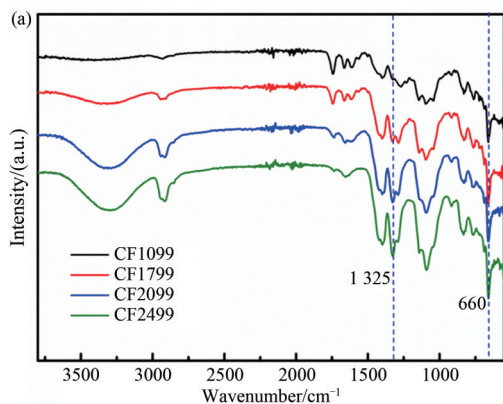


图6 (a)PVA偏光膜的红外光谱;(b)PVA偏光膜湿热老化前后的红外光谱。

Fig. 6 (a) FT-IR of PVA polarizing films; (b) FT-IR of PVA polarizing films before and after hydrothermal aging.

致的;另一方面,老化后所有偏光膜在 $1325\text{ cm}^{-1}$ 处 $\text{B-O}$ 键峰强度都有明显降低,表明湿热环境下 $\text{B-O}$ 键发生水解断裂,破坏了偏光膜的交联结构。利用硼酸进行PVA偏光膜的交联反应式如图7所示,在高温高湿环境下,水分子进入PVA基体中,使得硼酯键水解断裂,交联结构被破坏,碘离子流失,从而导致偏光膜老化失效。

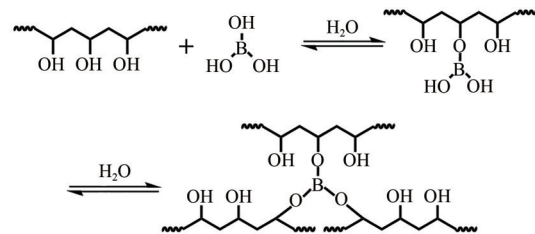


图7 硼酸交联与水解的反应

Fig. 7 Reaction diagram of crosslinking and hydrolysis of boric acid

## 4 结 论

通过对PVA偏光膜的湿热老化研究,考察了聚合度和交联对偏光膜耐湿热老化的影响,并探讨了其在湿热环境下的失效机理。实验结果表明,偏光膜耐湿热老化与其聚合度有关,随着PVA聚合度增加,增强了对碘离子的吸附,偏光膜中 $\text{I}_5^-$ 比重增加,其耐湿热老化性变好。交联体系对PVA偏光膜湿热稳定性有影响,交联可以有效降低偏光膜中碘离子的流失,相比未交联体

系,交联偏光膜整体耐老化性能大幅提高。在高温高湿环境中,水分子进入PVA分子链中,导致硼酯键水解,破坏了碘离子的定向排列,使碘离子流失从而导致偏光膜的失效。

#### 参 考 文 献:

- [1] KIM G H, YOON K J. Preparation and properties of polarizing films for liquid crystal display prepared using iodine vapor [J]. *Fibers and Polymers*, 2013, 14(12): 1999-2005.
- [2] 陶家顺,许卫峰,陈旭铨. 内置型偏光片技术的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(4): 538-548.  
TAO J S, XU W F, CHEN X Q. Review on in-cell polarizer technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(4): 538-548. (in Chinese)
- [3] CHANG J B, YUK S B, PARK J S, *et al.* Dichroic and spectral properties of anthraquinone-based azo dyes for PVA polarizing film [J]. *Dyes and Pigments*, 2012, 92(1): 737-744.
- [4] TRETINNIKOV O N, SUSHKO N I. Fabrication and optical properties of dichroic polarizing films based on poly(vinyl alcohol)-heteropolyacid nanocomposites [J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(12): 828.
- [5] TASHIRO K, KITAI H, SAHARIN S M, *et al.* Quantitative crystal structure analysis of poly(vinyl alcohol)-iodine complexes on the basis of 2D X-ray diffraction, Raman spectra, and computer simulation techniques [J]. *Macromolecules*, 2015, 48(7): 2138-2148.
- [6] HDIDAR M, CHOUIKHI S, FATTOUM A, *et al.* Effect of hydrolysis degree and mass molecular weight on the structure and properties of PVA films [J]. *Ionics*, 2017, 23(11): 3125-3135.
- [7] ZWICK M M. Poly(vinyl alcohol)-iodine complexes [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1965, 9(7): 2393-2424.
- [8] YE K, LI Y H, ZHANG W W, *et al.* Stretch-induced structural evolution of dichromatic substance with poly(vinyl alcohol) at different concentrations of boric acid: An *in-situ* synchrotron radiation small- and wide-angle X-ray scattering study [J]. *Polymer*, 2021, 212: 123297.
- [9] LYOO W S, YEUM J H, CHOI J H, *et al.* A method to determine iodine desorption of high molecular weight syndiotactic poly(vinyl alcohol)/iodine complex film [J]. *Polymer Testing*, 2001, 20(5): 503-507.
- [10] HAN M H, LYOO W S. Preparation of syndiotacticity-rich high molecular weight poly(vinyl alcohol)/iodine polarizing film with high water resistance [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 115(2): 917-922.
- [11] LYOO W S, YEUM J H, PARK J M, *et al.* Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the polarizing efficiency of PVA/azo dye complex film with high durability [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 96(4): 967-974.
- [12] SONG Y X, ZHANG S M, KANG J, *et al.* Water absorption dependence of the formation of poly(vinyl alcohol)-iodine complexes for poly(vinyl alcohol) films [J]. *RSC Advances*, 2021, 11(46): 28785-28796.
- [13] ZHANG R, ZHANG Q L, JI Y X, *et al.* Stretch-induced complexation reaction between poly(vinyl alcohol) and iodine: an *in situ* synchrotron radiation small- and wide-angle X-ray scattering study [J]. *Soft Matter*, 2018, 14(13): 2535-2546.
- [14] ZHANG Q L, ZHANG R, MENG L P, *et al.* Stretch-induced structural evolution of poly(vinyl alcohol) film in water at different temperatures: an *in-situ* synchrotron radiation small- and wide-angle X-ray scattering study [J]. *Polymer*, 2018, 142: 233-243.
- [15] SHIN E J, LYOO W S, LEE Y H. Polarizer effect and structure of iodinated before and after casting poly(vinyl alcohol) film [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 120(1): 397-405.
- [16] NECHIFOR C D, POSTOLACHE M, ALBU R M, *et al.* Induced birefringence of rubbed and stretched polyvinyl alcohol foils as alignment layers for nematic molecules [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, 30(8):

2143-2152.

- [17] YANG Y, ZHENG Z Y, LIN J, *et al.* Effect of KI concentration in correcting tank on optical properties of PVA polarizing film [J]. *Polymers*, 2022, 14(7): 1413.

作者简介:



牛宇洁(1997—),女,安徽合肥人,硕士研究生,2020年于黄山学院获得学士学位,主要从事高分子材料成型加工和偏光膜的相关研究。E-mail: 247243289@qq.com



丁运生(1966—),男,安徽合肥人,博士,教授,2003年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事高分子材料的结构控制与高性能化、功能与精细高分子的合成与应用等方面的研究。E-mail:dingys@hfut.edu.cn