

文章编号: 1008-9357(2025)04-0309-09

DOI: 10.14133/j.cnki.1008-9357.20250408001

## 环氧化合物对全息塑料性能的影响

赵曼, 陈杰, 鲁登福, 廖永贵, 周兴平, 彭海炎, 解孝林

(华中科技大学化学与化工学院, 能量转换与存储材料化学教育部重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 将聚醋酸乙烯酯(PVAc)、邻苯基苯氧乙基丙烯酸酯(OPPEA)、环氧化合物(2-联苯缩水甘油醚(BGE)、乙二醇二缩水甘油醚(GDE)、环氧丙基苯基醚(GPE))和光引发剂在二氯甲烷中混合均匀,涂布、干燥后得到全息感光膜,通过相干激光聚合诱导相分离原理制备了光聚合全息塑料。采用紫外-可见分光光谱(UV-Vis)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、差示扫描量热(DSC)等测试方法研究了这三种环氧化合物对光聚合全息塑料性能的影响。结果表明,环氧化合物能够显著提高光聚合全息塑料的衍射效率,但添加量过高会导致衍射效率下降。当BGE质量分数为24%时,蓝、绿、红单色全息塑料的衍射效率均高于97%,可见光区透光率大于80%,雾度低于3%;真彩色全息塑料的蓝、绿、红色衍射效率分别达到65%、56%和46%,可见光区透光率大于70%,雾度仅2%。

**关键词:** 全息塑料; 光聚合; 环氧化合物; 衍射效率; 真彩色

**中图分类号:** O631

**文献标志码:** A

## Effects of Epoxide Compounds on the Performance of Holographic Plastic

ZHAO Man, CHEN Jie, LU Dengfu, LIAO Yonggui, ZHOU Xingping, PENG Haiyan, XIE Xiaolin

(Key Laboratory of Material Chemistry for Energy Conversion and Storage, Ministry of Education, School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Photosensitive films for holography were fabricated through homogeneous mixing of poly(vinyl acetate), 2-(2-biphenyloxy)ethyl acrylate, an epoxide compound, and a photoinitiator in dichloromethane, followed by blade coating and drying. Photopolymerized holographic plastics were then prepared using the principle of holographic photopolymerization-induced phase separation under coherent laser irradiation. The influences of three epoxides, namely, 2-biphenyl glycidyl ether (BGE), ethylene glycol diglycidyl ether (GDE), and glycidyl phenyl ether (GPE), on the performance of photopolymerized holographic plastics were systematically investigated using ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis), Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), and differential scanning calorimetry (DSC), respectively. Results indicate that the diffraction efficiency of holographic plastics can be significantly enhanced with an augmentation of the epoxide content. However, this would be decreased when the epoxide content is too high. When the mass fraction of BGE reaches 24%, monochromatic holographic plastics in blue, green and red colors can be achieved respectively. These plastics exhibit excellent diffraction

收稿日期: 2025-04-08

基金项目: 国家重点研发计划(2023 YFB3812404); 国家自然科学基金(52233005)

作者简介: 赵曼(1999—),女,河南延津人,硕士生,主要研究方向为光聚合全息塑料的性能调控。E-mail: zhaomanzz@163.com

通信联系人: 鲁登福, E-mail: dlu@hust.edu.cn; 彭海炎, E-mail: hypeng@hust.edu.cn

引用格式: 赵曼,陈杰,鲁登福,廖永贵,周兴平,彭海炎,解孝林. 环氧化合物对全息塑料性能的影响[J]. 功能高分子学报, 2025, 38(4): 309-317.

**Citation:** ZHAO Man, CHEN Jie, LU Dengfu, LIAO Yonggui, ZHOU Xingping, PENG Haiyan, XIE Xiaolin. Effects of Epoxide Compounds on the Performance of Holographic Plastic [J]. Journal of Functional Polymers, 2025, 38(4): 309-317.

efficiencies of over 97%, high visible light transmittance of above 80%, and low haze of under 3%. A full-color holographic plastic was also fabricated, exhibiting diffraction efficiencies of 65%, 56%, and 46% for blue, green and red colors, respectively, with visible light transmittance higher than 70% and with a haze of 2%.

**Key words:** holographic plastics; photopolymerization; epoxide compound; diffraction efficiency; full color

光聚合全息塑料因具有信息容量大、光学品质高、单层真彩色等优点,在高端防伪<sup>[1-8]</sup>、增强现实/虚拟现实<sup>[9-13]</sup>、高密度数据存储<sup>[14-17]</sup>等前沿技术领域具有重要应用价值,该材料可通过树脂基体/光聚合单体/光引发剂复合体系的相干激光聚合诱导相分离原理加工得到。在全息加工过程中,光聚合单体从相干暗区往相干亮区扩散,参与亮区聚合并诱导体系发生有序相分离,通过形成周期性折射率调制光栅的方式存储物光(如激光照射实物后产生的漫反射光)的全部信息。一般而言,光聚合单体从相干暗区往相干亮区的扩散越容易,有序相分离程度就越高,折射率调制度也就越大,在不发生过调制的情况下会显著提高材料的衍射效率<sup>[18-22]</sup>。需要注意的是,光聚合全息塑料的光学品质除了高衍射效率之外,还包括高透光率和低雾度,因此应使相分离微区的尺寸小于光栅周期,避免体系发生宏观尺度的相分离<sup>[23-26]</sup>。

增塑是促进扩散的一种重要方式<sup>[27]</sup>。增塑剂能够降低树脂基体的玻璃化转变温度( $T_g$ )<sup>[28]</sup>,进而促进光聚合单体的扩散。Jin等<sup>[29]</sup>研究了 $N,N$ -二甲基甲酰胺(DMF)作为增塑剂对非酞掺杂聚甲基丙烯酸甲酯全息材料体系的影响,当DMF的质量分数增至20%时,衍射效率可达80%,感光灵敏度提高了8.1倍。与传统增塑剂相比,反应性增塑剂不仅能够起到增塑效应,还能参与聚合反应,提升材料的环境可靠性<sup>[27]</sup>。然而,反应性增塑剂对光聚合全息塑料性能的影响规律尚未得到系统研究。

本文以聚醋酸乙烯酯(PVAc)为树脂基体、邻苯基苯氧乙基丙烯酸酯(OPPEA)为光聚合单体、小分子环氧化合物(2-联苯缩水甘油醚(BGE)、乙二醇二缩水甘油醚(GDE)、环氧丙基苯基醚(GPE))作为反应性增塑剂,制备了光学品质优异的光聚合全息塑料,并研究了环氧化合物对光聚合全息塑料衍射效率、透光率、雾度等的影响规律。环氧化合物对体系的增塑作用可促进单体在自由基光聚合过程中的扩散,提高光聚合全息塑料的相分离程度和衍射效率,并利用其阳离子聚合特性降低光聚合全息塑料中残留的环氧小分子。

## 1 实验部分

### 1.1 原料和试剂

PVAc( $M_n = 222\ 600$ ): 国药集团化学试剂有限公司; OPPEA: 分析纯, 武汉华翔科洁有限公司; BGE、GDE: 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; GPE、二氯甲烷(DCM): 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 全息感光膜的制备

在避光条件下,将树脂基体 PVAc、光聚合单体 OPPEA、环氧化合物(BGE、GPE 或 GDE)、光引发剂(包括光敏剂和共引发剂)和 DCM 按比例加入棕色瓶中,在室温下搅拌均匀,得到全息感光溶液。以 200 mm/s 的速率将全息感光溶液均匀涂布在洁净的玻璃片(5 cm×5 cm)表面,涂布器高度设置为 100 μm。涂布完成后,置于 45 °C 热台上加热 5 min,得到全息感光膜,最后在其表面覆盖厚度为 50 μm 的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)保护膜。在整个研究过程中,固定  $w(\text{PVAc})$  为 40%,光引发剂和 DCM 的添加量保持不变,通过改变光聚合单体和环氧化合物的质量比设置了 6 个实验组。作为对比,设置了 OPPEA 与 PVAc 质量比( $m(\text{OPPEA})/m(\text{PVAc})$ )与实验组相同,但不含环氧化合物的对照组。

### 1.3 光聚合全息塑料的制备

将全息感光膜样品置于如图 1(a)所示的光路中进行全息曝光。入射光透过样品后垂直照射平面镜,经平面镜反射后产生一束同源相干光,与入射光在镜面法线方向发生干涉,在全息感光膜内部引发光聚合反应并诱导有序相分离,制得反射式光栅结构的光聚合全息塑料。图 1(b)为光聚合全息塑料的有序相分离机理示意图。在相干亮区,单体 OPPEA 在光引发剂的作用下发生自由基聚合反应,诱导与 PVAc 树脂基体发生有序相分离,形成周期性折射率调制的光栅结构。制备光聚合全息塑料所采用的蓝、绿、红色激光的波长分别为 460、532、640 nm,曝光强度为 0.5 mW/cm<sup>2</sup>,曝光时间为 30 s。全息曝光后,采用紫外光后固化 300 s,以稳定光聚合全息塑料内部的光栅结构。本研究涉及的树脂基体 PVAc、光聚合单体 OPPEA 以及环氧化合物

(BGE、GPE 和 GDE)的化学结构式如图 1(c)所示。光聚合单体以及环氧化合物的聚合反应如图 1(d)所示。

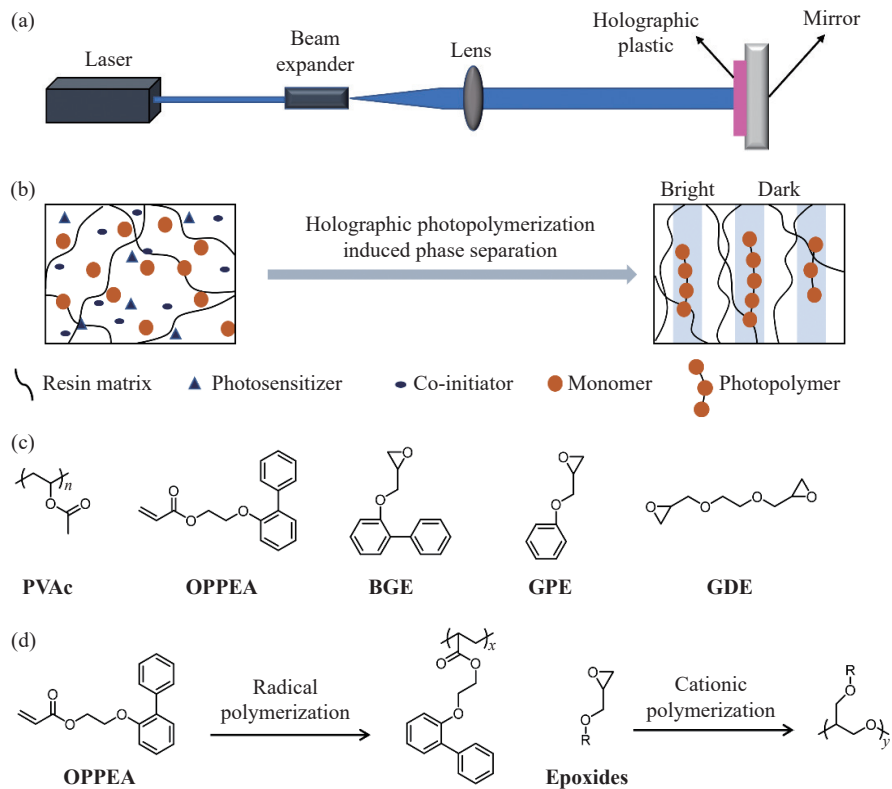


图 1 (a)制备反射式光栅结构的光聚合全息塑料的光路示意图;(b)光聚合全息塑料的成型原理示意图;(c)树脂基体、光聚合单体及环氧化合物的化学结构式;(d)光聚合单体和环氧化合物的聚合反应

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the optical setup for fabricating photopolymerized holographic plastic with reflective grating structures; (b) Schematic illustration of the forming principle of photopolymerized holographic plastic; (c) Chemical structures of the resin matrix, photopolymerizable monomer, and epoxides; (d) Polymerization reaction of photopolymerizable acrylate monomer and epoxides

## 1.4 测试与表征

**衍射效率:**通过紫外-可见分光光度计(美国 Thermo Fisher 公司 Evolution 220 型)表征全息塑料在 400~750 nm 波段的透光率,根据透光率曲线得到最小透光率( $T_{\min}$ )和基线透光率( $T_{\max}$ ),由公式(1)计算全息塑料的衍射效率( $\eta$ )<sup>[30]</sup>。

$$\eta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

**雾度:**采用雾度仪(上海申光仪器仪表有限公司 WGT-S 型)表征光聚合全息塑料的雾度,以空气作为背景。

**差示扫描量热(DSC)分析:**采用差示扫描量热仪(美国 TA 公司 Q2000 型)表征树脂基体的玻璃化转变温度( $T_g$ ),升温速率为 20 °C/min,温度区间为-20~50 °C。

**傅里叶变换红外光谱(FT-IR):**采用傅里叶变换红外光谱仪(德国 Bruker 公司 Vertex 80 型)表征聚合反应动力学,引发光聚合反应的可见光光源为 532 nm 绿光 LED,光强为 1 mW/cm<sup>2</sup>,紫外光光源为 Series 2000 型,UVA 波段的光强为 300 mW/cm<sup>2</sup>。通过实时监测特征峰强度变化,根据光反应前后的峰面积计算得到相应单体的转化率( $\alpha$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 环氧化物类型及含量对光聚合全息塑料性能的影响

$w(\text{GPE})$ 对单色光聚合全息塑料的衍射效率和雾度的影响如图 2 所示。随着  $w(\text{GPE})$ 的增加,蓝、绿、红

这三种单色光聚合所得全息塑料的衍射效率均先上升后下降。当  $w(\text{GPE})$  分别为 18%、18% 和 24% 时, 蓝、绿、红光全息塑料的衍射效率达到最大值, 且最大衍射效率分别为 99%、99% 和 97%。这可能是 GPE 在体系中发挥了增塑作用, 促进了光聚合单体的扩散, 从而提高了有序相分离程度。在高  $w(\text{GPE})$  体系中, 衍射效率下降主要归因于 OPPEA 含量减少, 进而导致折射率调制不足<sup>[20]</sup>。雾度随  $w(\text{GPE})$  增加呈现上升趋势, 归因于反射式光栅结构平面内的均质性下降。

$w(\text{GDE})$  对单色光聚合全息塑料的衍射效率和雾度的影响如图 3 所示。结合图 2 可知, GDE 对全息性能的影响呈现出与 GPE 相似的规律。蓝、绿、红单色全息塑料的衍射效率均在  $w(\text{GDE})$  为 18% 时达到最大值 (99%), 雾度均小于 5%。

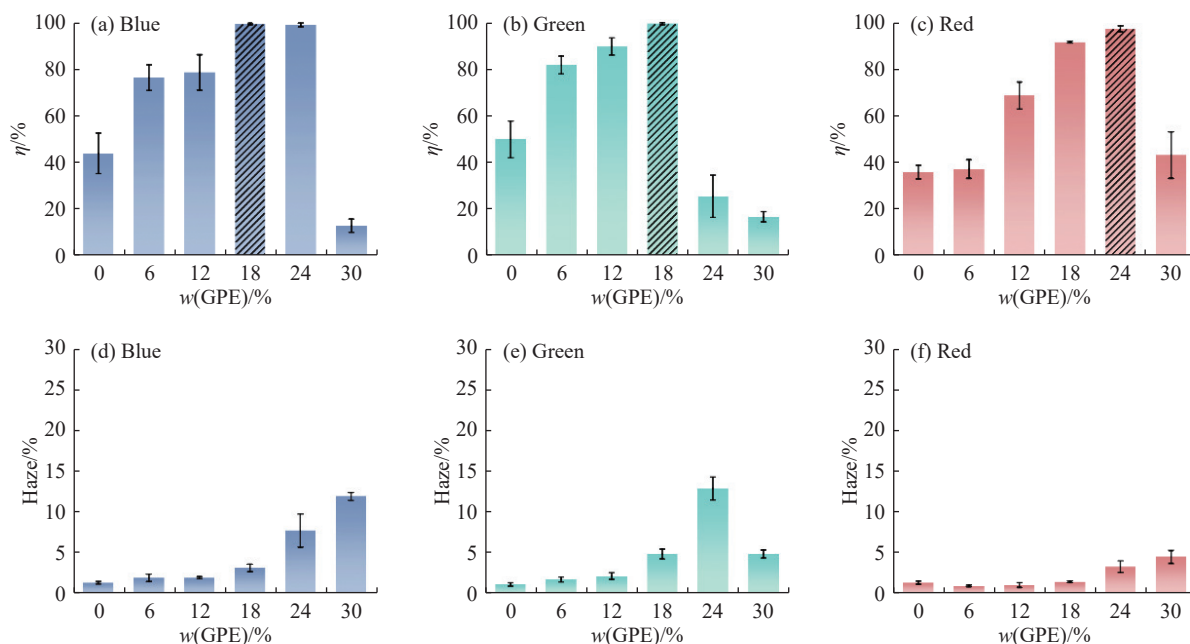


图 2  $w(\text{GPE})$  对单色光聚合全息塑料的(a~c)衍射效率及(d~f)雾度的影响

Fig. 2 Influences of  $w(\text{GPE})$  on the (a—c) diffraction efficiency and (d—f) haze of photopolymerized holographic plastic in a single color

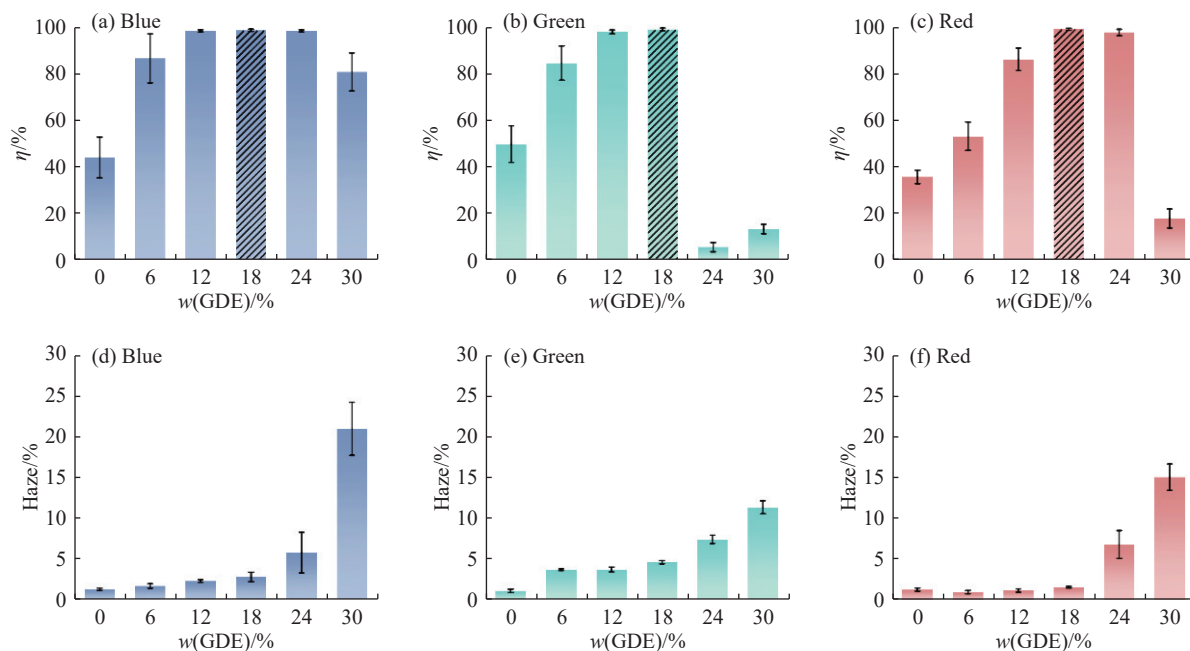


图 3  $w(\text{GDE})$  对单色光聚合全息塑料的(a~c)衍射效率及(d~f)雾度的影响

Fig. 3 Influences of  $w(\text{GDE})$  on the (a—c) diffraction efficiency and (d—f) haze of photopolymerized holographic plastic in a single color

与 GPE 和 GDE 不同,添加与光聚合单体结构相似的 BGE 时(图 4),光聚合全息塑料的衍射效率不仅在更宽的浓度范围内持续提升,同时雾度也没有受到明显的负面影响,这归因于 BGE 与该体系具有更好的相容性。可以看出,BGE 的最佳质量分数为 24%,此时光聚合全息塑料的三色衍射效率均在 97% 以上,且雾度不超过 2%。综上所述,GPE、GDE、BGE 这 3 种环氧化合物的添加均能显著提高光聚合全息塑料的衍射效率,其中 BGE 对材料雾度的影响最小。

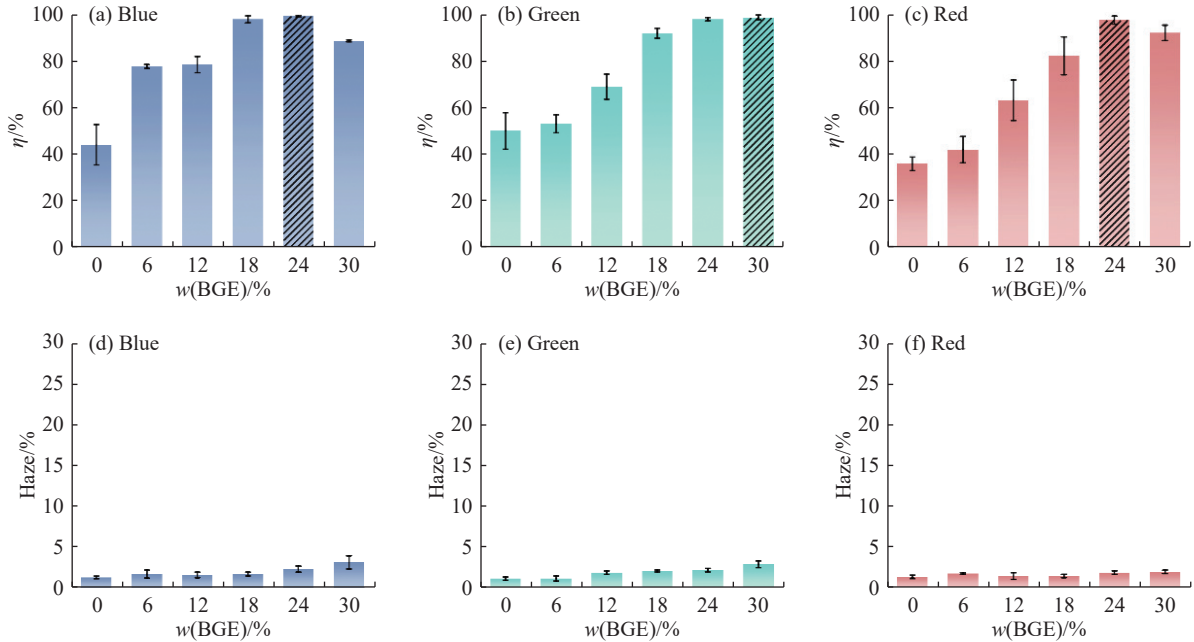


图 4  $w(\text{BGE})$ 对单色光聚合全息塑料的(a~c)衍射效率及(d~f)雾度的影响

Fig. 4 Influences of  $w(\text{BGE})$  on the (a—c) diffraction efficiency and (d—f) haze of photopolymerized holographic plastic in a single color

由于  $w(\text{PVAc})$  固定为 40%,随着环氧化合物含量的增加,光聚合单体 OPPEA 的含量相应减少。为理解衍射效率降低的原因,设置了与图 2~图 4 中实验组分别具有相同  $m(\text{OPPEA})/m(\text{PVAc})$ ,但不含环氧化合物的对照组。由图 5 可知,在不含环氧化合物的对照组中,随着 OPPEA 含量的减少,光聚合全息塑料的衍射效

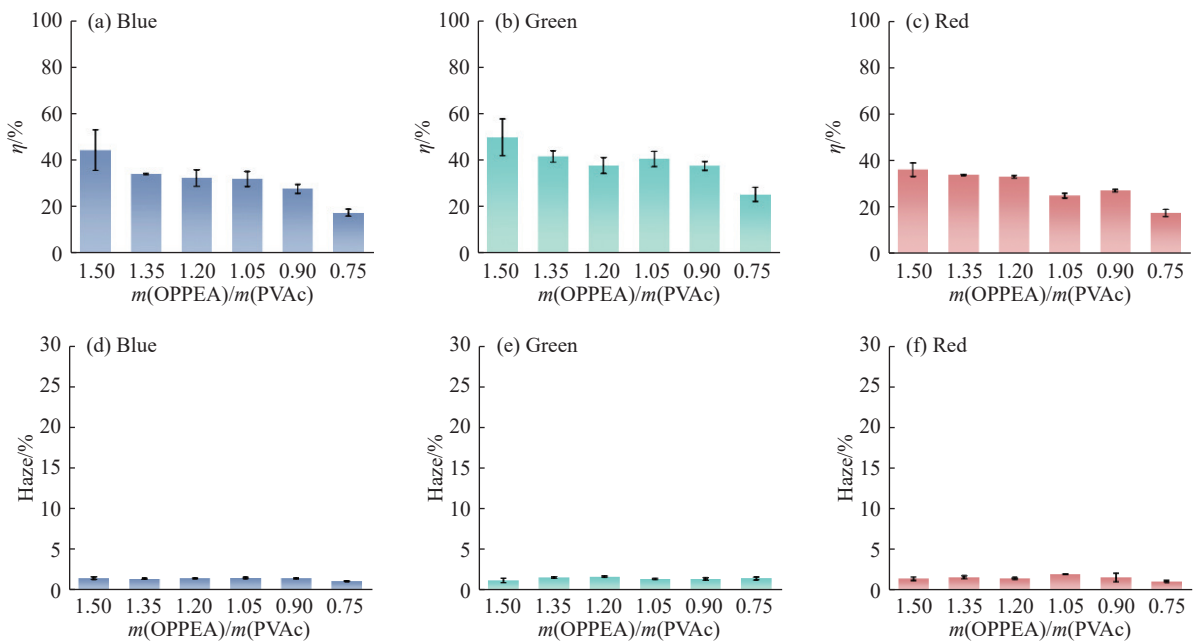


图 5  $m(\text{OPPEA})/m(\text{PVAc})$ 对无环氧化合物单色光聚合全息塑料的(a~c)衍射效率及(d~f)雾度的影响

Fig. 5 Influences of  $m(\text{OPPEA})/m(\text{PVAc})$  on the (a—c) diffraction efficiency and (d—f) haze of photopolymerized holographic plastic without epoxides in a single color

率呈下降趋势,这主要归因于 OPPEA 含量减少所导致的折射率调制不足。

## 2.2 基于 BGE 的单色和真彩色光聚合全息塑料

图 6(a~c)为光聚合全息塑料( $w(\text{BGE})=24\%$ )的透光率曲线。可以看出,基于 BGE 制备的三种单色反射式全息光栅在可见光区非布拉格条件下的透光率均在 80% 以上,这得益于 PVAc、光聚合物与 BGE 三者之间较好的相容性。由图 6(d~f)可知,蓝、绿、红单色全息塑料的衍射效率均大于 97%,雾度均低于 3%,衍射峰的光谱半峰宽(FWHM)均大于 14 nm。光谱半峰宽越大,显示亮度越高<sup>[20,31]</sup>。

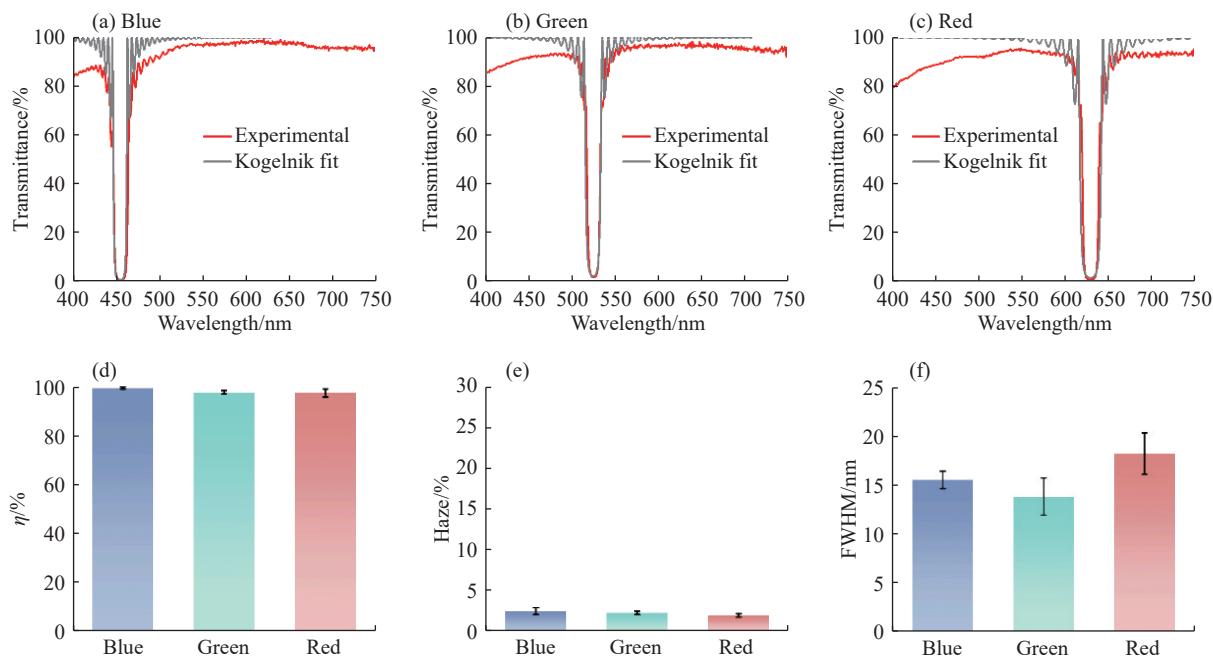


图 6 单色光聚合全息塑料的(a~c)透光率曲线、(d)衍射效率、(e)雾度与(f)光谱半峰宽

Fig. 6 (a—c) Transmittance curves, (d) diffraction efficiency, (e) haze, and (f) full width at half maximum of photopolymerized holographic plastic in a single color

在优化的体系下,采用光强均为  $2 \text{ mW/cm}^2$  的蓝、绿、红三色激光同时曝光 10 s,制备真彩色光聚合全息塑料。以 BGE 为增塑剂时制备的真彩色光聚合全息塑料的透光率曲线如图 7 所示。由计算可知,该彩色光聚合全息塑料的蓝、绿、红色衍射效率分别为 65%、56% 和 46%,同时其雾度仅为 2%。

## 2.3 环氧化合物对光聚合全息塑料的影响机制

为验证环氧化合物的增塑作用,采用差示扫描量热表征了不同 BGE 含量下 PVAc 的  $T_g$ 。各组样品去溶剂过程的质量变化曲线如图 8(a)所示。将 PVAc 和 BGE 在 DCM 中混合均匀后,在  $45^\circ\text{C}$  下加热干燥,当加热至 20 min 后各组样品的质量基本不再改变,表明样品中的 DCM 已完全挥发,确保 DSC 测试的准确性。不同 BGE 含量时 PVAc 的 DSC 曲线如图 8(b)所示。可以看出,随着  $m(\text{BGE})/m(\text{PVAc})$  从 0 增至 0.6, PVAc 的  $T_g$  从  $38.0^\circ\text{C}$  降低至  $-2.9^\circ\text{C}$ ,表明 BGE 在体系中发挥了增塑作用,促进了高分子链段的运动。

OPPEA 和 BGE 的光反应动力学曲线如图 9 所示。可以看出,OPPEA 在可见光下辐照 95 s 时反应完全,转化率高达 97%,而 BGE 在可见光辐照下的转化率仅为 23%。研究表明大部分 BGE 能够发挥增塑作用,进

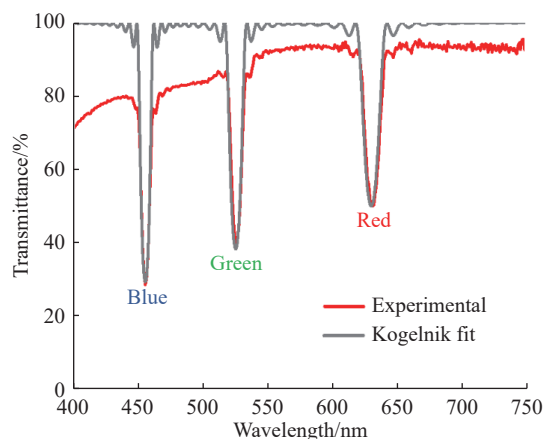


图 7 真彩色光聚合全息塑料的透光率曲线

Fig. 7 Transmittance curves of the full-color photopolymerized holographic plastic

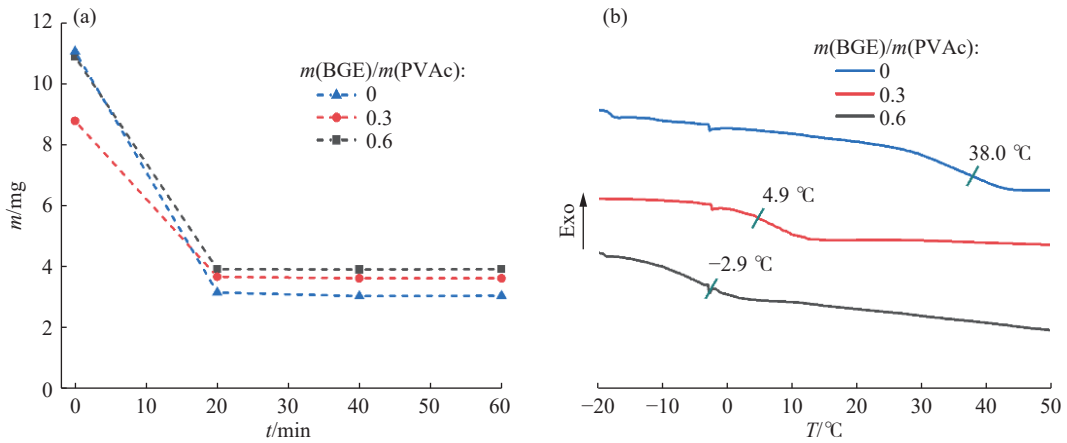


图 8 (a) 去溶剂过程中的质量变化; (b) 去溶剂至恒重后的 DSC 曲线

Fig. 8 (a) Mass variation during desolvation; (b) DSC curves after complete desolvation

而提高光聚合全息塑料的有序相分离程度。在后续 UV 固化过程中, BGE 的转化率进一步提高到 50%, 降低了光聚合全息塑料中的小分子残留, 有利于提高光聚合全息塑料的综合性能。因此, 环氧化合物 BGE 不仅起到增塑作用, 还能够参与光聚合反应。

#### 2.4 裸眼 3D 全息图像存储与显示

基于 BGE 的光聚合全息塑料表现出优异的光学品质, 在高端防伪领域具有较强的应用潜力。在 460、532 nm 和 640 nm 相干激光下分别存储了蓝色、绿色和红色的“绵羊”图像, 从左、前、右这三个方向可观察到不同的立体形态(图 10)。这些图像不仅具有 3D 效果, 还裸眼可见, 具有易识别、难伪造的高端防伪特征。

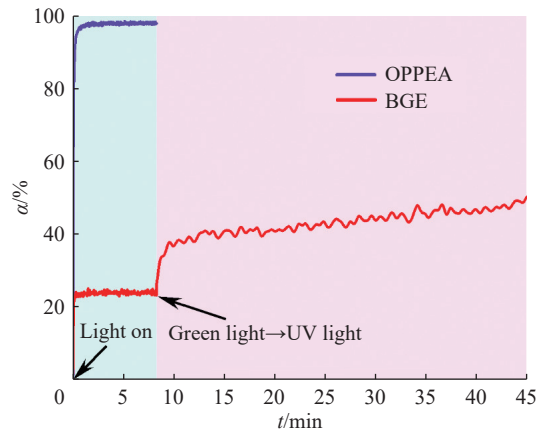


图 9 OPPEA 和 BGE 在光照下的反应动力学曲线

Fig. 9 Reaction kinetic curves of OPPEA and BGE upon light irradiation

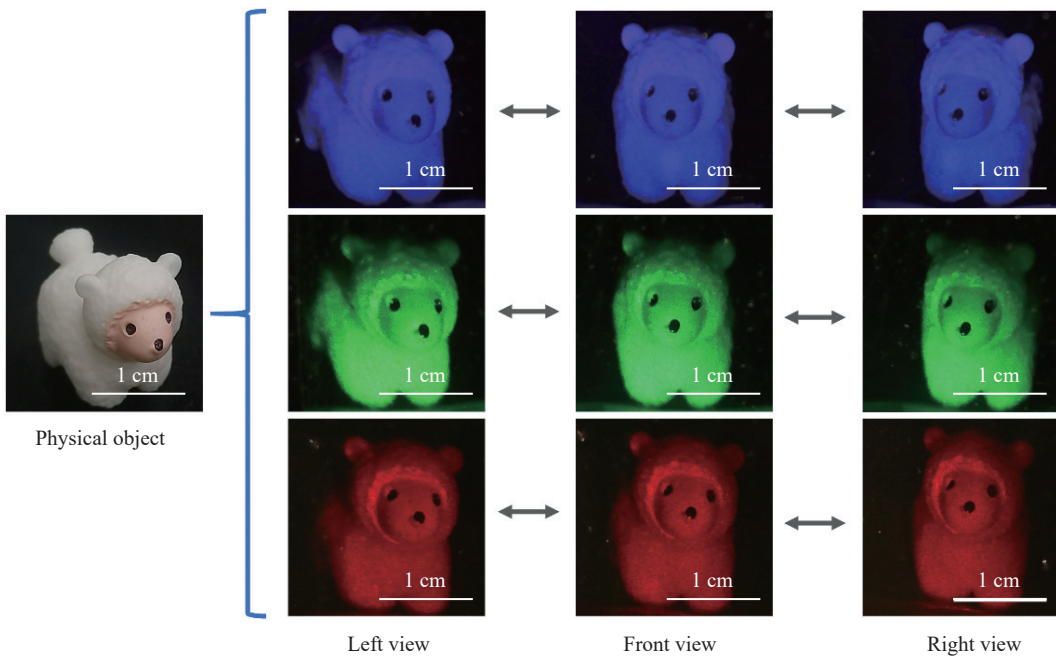


图 10 蓝、绿、红单色裸眼 3D 全息图像

Fig. 10 Naked-eye recognizable 3D holographic images in the monochromatic color of blue, green, and red, respectively

### 3 结 论

(1) 小分子环氧化合物既能发挥增塑效应, 降低 PVAc 树脂的玻璃化转变温度, 促进全息加工中的单体扩散和有序相分离, 又能在紫外后固化阶段发生聚合, 提升光聚合全息塑料的综合性能。

(2) 基于小分子环氧化合物这类反应性增塑剂制备了蓝、绿、红单色光聚合全息塑料及真彩色光聚合全息塑料, 三种单色光聚合全息塑料的衍射效率均大于 97%, 雾度低于 3%, 且衍射峰的光谱半峰宽均大于 14 nm; 真彩色全息塑料的蓝、绿、红色衍射效率分别为 65%、56% 和 46%, 雾度仅 2%。

(3) 基于光聚合全息塑料实现了裸眼 3D 图像存储与显示, 为高端防伪提供了易识别、难伪造的技术方案。

#### 参考文献:

- [ 1 ] YAO M, WEI W, QIAO W G, ZHANG Y, ZHOU X P, LI Z A, PENG H Y, XIE X L. High-security plastic with integrated holographic and phosphorescent images [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(12): 2414894.
- [ 2 ] HU Y X, HAO X T, WANG D, ZHANG Z C, SUN H T, XU X D, XIE X L, SHI X L, PENG H Y, YANG H B, XU L. Light-responsive supramolecular liquid-crystalline metallacycle for orthogonal multimode photopatterning [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(4): e202315061.
- [ 3 ] ZHAO Y, ZHAO X Y, LI M D, LI Z A, PENG H Y, XIE X L. Crosstalk-free patterning of cooperative-thermoreponse images by the synergy of the AIEgen with the liquid crystal [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(25): 10066-10072.
- [ 4 ] YAO M, ZHAO Y, ZHOU X P, LI Z A, PENG H Y, XIE X L. Orthogonal integration of holographic and fluorescent dual images based on energy transfer from liquid crystals to a photocleavable AIEgen [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11(10): 3504-3512.
- [ 5 ] WANG D, WANG Y X, ZHOU X P, LI Z A, PENG H Y, XIE X L. Photocycloaddition of Pt(II) complexes in supramolecular composites for three-dimensional + two-dimensional image integration via reaction orthogonality [J]. *CCS Chemistry*, 2024. <https://doi.org/10.31635/ccschem.024.202404911>.
- [ 6 ] ZHAO Y, PENG H Y, ZHOU X P, LI Z A, XIE X L. Interfacial AIE for orthogonal integration of holographic and fluorescent dual-thermosensitive images [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(10): e2105903.
- [ 7 ] NI M L, LUO W, WANG D, ZHANG Y, PENG H Y, ZHOU X P, XIE X L. Orthogonal reconstruction of upconversion and holographic images for anticounterfeiting based on energy transfer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(16): 19159-19167.
- [ 8 ] ZHANG X M, YAO W J, ZHOU X P, WU W, LIU Q K, PENG H Y, ZHU J T, SMALYUKH I I, XIE X L. Holographic polymer nanocomposites with simultaneously boosted diffraction efficiency and upconversion photoluminescence [J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 181: 107705.
- [ 9 ] CHANG C L, BANG K, WETZSTEIN G, LEE B, GAO L. Toward the next-generation VR/AR optics: A review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective [J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1563-1578.
- [ 10 ] XIONG J H, ZHONG H Z, CHENG D W, WU S T, WANG Y T. Full degree-of-freedom liquid crystal holographic optics for AR/VR displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2024, 55: 550-553.
- [ 11 ] HE L, CHEN X Q, YANG Y H, LIU X Z, CHEN Y T, XU L X, GU C. Using high-diffraction-efficiency holographic optical elements in a full-color augmented reality display system [J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 29843-29858.
- [ 12 ] 倪名立, 杨松, 周兴平, 彭海炎, 孙其民, 解孝林. 面向 VR/AR 应用的全息高分子材料 [J]. *高分子学报*, 2023, 54(4): 418-431.  
NI M L, YANG S, ZHOU X P, PENG H Y, SUN Q M, XIE X L. Holographic polymer materials for VR/AR applications [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2023, 54(4): 418-431.
- [ 13 ] WANG M Y, ZHANG Y, WANG D, YAO M, WANG Y X, ZHOU X P, PENG H Y, XIE X L. Holographic polymer nanocomposites with high refractive index modulation by doping liquid crystal E6M [J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2024, 42(7): 926-935.
- [ 14 ] BRUDER F K, HAGEN R, ROLLE T, WEISER M S, FACKE T. From the surface to volume: Concepts for the next generation of optical-holographic data-storage materials [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(20): 4552-4573.
- [ 15 ] CHEN Y X, HU P, HUANG Z Y, WANG J Y, SONG H Y, CHEN X, LIN X, WU T M, TAN X D. Significant enhancement of the polarization holographic performance of photopolymeric materials by introducing graphene oxide [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(23): 27500-27512.

- [16] SINGH S K, KINASHI K, TSUTSUMI N, SAKAI W, JACKIN B J. High-density polarization multiplexed holograms using azo-carbazole films for diverse applications [J]. *Optics Express*, 2024, 32(13): 22602-22614.
- [17] 郭红喜, 姚铭, 赵晔, 彭海炎, 周兴平, 解孝林. 全息高分子材料的正交反应设计 [J]. *高分子学报*, 2022, 53(7): 722-736.  
GUO H X, YAO M, ZHAO Y, PENG H Y, ZHOU X P, XIE X L. Design of orthogonal reactions in holographic polymer materials [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2022, 53(7): 722-736.
- [18] WEI W, CHEN G N, LI S, ZHOU X P, PENG H Y, XIE X L, MAI Y W. Computational insight into phase separation of a thiol-ene photopolymer with liquid crystals for holography by dissipative particle dynamics simulation [J]. *Macromolecules*, 2023, 56(14): 5457-5469.
- [19] WEI W, LI S, ZHOU X P, PENG H Y, XIE X L. Thiol-ene photopolymerization enhances liquid crystal ordering and structural regularity in holographic polymer nanocomposites: A coupled DPD-FDTD simulation [J]. *Macromolecules*, 2025, 58(5): 2459-2471.
- [20] WANG D, LIU S, WEI W, GUO H X, ZHANG Y, PENG H Y, ZHOU X P, XIE X L. Holographic plastics with liquid crystals [J]. *Macromolecules*, 2024, 57(6): 2557-2573.
- [21] PENG H Y, NAIR D P, KOWALSKI B A, XI W X, GONG T, WANG C, COLE M, CRAMER N B, XIE X L, MCLEOD R R, BOWMAN C N. High performance graded rainbow holograms via two-stage sequential orthogonal thiol-click chemistry [J]. *Macromolecules*, 2014, 47(7): 2306-2315.
- [22] PENG H Y, WANG C, XI W X, KOWALSKI B A, GONG T, XIE X L, WANG W T, NAIR D P, MCLEOD R R, BOWMAN C N. Facile image patterning via sequential thiol-michael/thiol-yne click reactions [J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(23): 6819-6826.
- [23] GUO H X, XIE Y, LU D F, LIAO Y G, ZHOU X P, LI Z A, PENG H Y, XIE X L. Reliable holographic plastic for augmented reality display[J/OL]. *Advanced Optical Materials*, 2025. <https://doi.org/10.1002/adom.202500612>.
- [24] HU Y F, TRUJILLO-LEMON M, SIAS A N, DOBSON A L, PODGÓRSKI M, SINGH J, MAVILA S, MCLEOD R R, BOWMAN C N. Reducing haze of holographic gratings recorded in a two-stage photopolymer [J]. *Macromolecules*, 2025, 58(2): 919-930.
- [25] HU Y F, PODGÓRSKI M, MAVILA S, SINHA J, FAIRBANKS B D, MCLEOD R R, BOWMAN C N. Dynamic polymer binder with light-regulated molecular weight via addition-fragmentation chain transfer for holographic recording [J]. *Macromolecules*, 2023, 56(6): 2536-2541.
- [26] HU Y F, MAVILA S, PODGÓRSKI M, KOWALSKI J E, MCLEOD R R, BOWMAN C N. Manipulating the relative rates of reaction and diffusion in a holographic photopolymer based on thiol-ene chemistry [J]. *Macromolecules*, 2022, 55(5): 1822-1833.
- [27] GODWIN A D. *Plasticizers-Applied Plastics Engineering Handbook*[M]. Third edition. New York: William Andrew Publishing, 2024: 595-618.
- [28] DANIELS P H. A brief overview of theories of PVC plasticization and methods used to evaluate PVC-plasticizer interaction [J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2009, 15(4): 219-223.
- [29] JIN J C, WU J H, HU P, LIN X, TAN X D. Strategy for simple control of high performance PQ/PMMA holographic media [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(38): 51575-51583.
- [30] YOSHIKAWA H. Toward international standards on evaluation of holograms [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11102: 111020U.
- [31] XIONG J H, YIN K, LI K, WU S T. Holographic optical elements for augmented reality: Principles, present status, and future perspectives [J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(1): 2000049.

(责任编辑: 王吉晶)