

文章编号: 1008-9357(2025)05-0430-09

DOI: 10.14133/j.cnki.1008-9357.20250511001

## 光、热可控双重动态键聚合物的设计及性能

刘晓旭, 李欣宇, 白静, 陈飞

(西安交通大学化学工程与技术学院, 西安 710049)

**摘要:** 将动态亚胺键和蒽基团引入聚合物体系, 构建了双重动态交联网络, 系统研究了其光响应行为、流变动力学特性及力学性能。利用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)和核磁共振氢谱(<sup>1</sup>H-NMR)对样品进行表征, 表明成功合成了具有动态亚胺键与光响应基团的双重动态键聚合物。通过紫外-可见光谱表征, 可直观观察到光照过程中化学结构的变化, 揭示光交联反应的成功进行。随着光照时间的延长, 样品的杨氏模量逐渐增大(从 10.33 MPa 增大至 17.52 MPa), 断裂伸长率整体呈现下降趋势(从 167% 降至 105%), 拉伸强度先增大后减小, 表明光照时间的延长会导致材料脆性增强。光交联后样品在温度扫描中出现 2 个拐点(95 °C 和 142 °C), 揭示了其内部动态亚胺键交换与光交联结构解聚的不同温度响应性, 表明了双重动态键聚合物网络的多重响应能力。光交联样品在高温下仍保持较高的模量, 但在更高温度(如 160 °C)下, 光交联结构逐渐解聚, 材料进入黏流状态。

**关键词:** 光响应; 动态共价键; 聚合物; 流变; 动力学

中图分类号: TQ317.3

文献标志码: A

## Design and Performance of Dual Dynamic Crosslinked Polymer with Light and Thermal Tunable Properties

LIU Xiaoxu, LI Xinyu, BAI Jing, CHEN Fei

(School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** By incorporating dynamic imine bonds and anthracene moieties into a polymer matrix, we constructed a dual-dynamic cross-linked network and systematically investigated its photo-responsive behavior, rheological dynamics, and mechanical properties. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) and <sup>1</sup>H-Nuclear Magnetic Resonance (<sup>1</sup>H-NMR) confirmed that the target polymer bearing both dynamic imine linkages and photo-responsive groups was successfully synthesized. Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectroscopy revealed four characteristic absorption peaks in the range of 300 nm to 400 nm, allowing the evolution of the chemical structure under irradiation to be directly monitored and verifying the occurrence of the photo-crosslinking reaction. To elucidate the effect of irradiation time on mechanical performance, tensile tests were conducted after precisely controlled exposure periods. As irradiation time increased, the Young's modulus rose steadily from 10.33 MPa to 17.52 MPa, while the elongation at break decreased from 167% to 105%. The tensile strength

收稿日期: 2025-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(22178278)

作者简介: 刘晓旭(2001—), 女, 河南安阳人, 硕士生, 主要研究方向为聚合物流变学。E-mail: [LiuXiaoxu@stu.xjtu.edu.cn](mailto:LiuXiaoxu@stu.xjtu.edu.cn)通信联系人: 白静, E-mail: [baijing8895@xjtu.edu.cn](mailto:baijing8895@xjtu.edu.cn); 陈飞, E-mail: [feichen@xjtu.edu.cn](mailto:feichen@xjtu.edu.cn)

引用格式: 刘晓旭, 李欣宇, 白静, 陈飞. 光、热可控双重动态键聚合物的设计及性能 [J]. 功能高分子学报, 2025, 38(5): 430-438.

**Citation:** LIU Xiaoxu, LI Xinyu, BAI Jing, CHEN Fei. Design and Performance of Dual Dynamic Crosslinked Polymer with Light and Thermal Tunable Properties [J]. Journal of Functional Polymers, 2025, 38(5): 430-438.

initially increased and then declined, indicating that excessive irradiation induces greater brittleness. Rheological measurements further showed two inflection points at 95 °C and 142 °C during temperature sweeps of the photocross-linked sample, directly evidencing distinct temperature responses associated with internal dynamic-imine bond exchange and depolymerization of the photocross-linked network, respectively. Stress-relaxation experiments revealed that, although the photocross-linked material retained a high modulus at elevated temperatures, the network gradually depolymerized at high temperatures (e.g., 160 °C), transitioning the material into a viscous-flow state. These results demonstrate the multi-responsive capability of the dual-dynamic polymer network.

**Key words:** photo-responsive; dynamic covalent bond; polymer; rheology; kinetics

动态共价键(DCB)因其可逆性和响应性,在智能材料领域展现出巨大的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。动态共价材料能够在外部刺激下实现自我修复、形状记忆以及适应性变化,拓展了其在柔性电子、传感器和智能器件等领域的应用前景<sup>[4-8]</sup>。然而,单一动态共价键的响应性往往受限于特定的刺激条件,难以满足复杂应用场景中对材料多功能化的需求<sup>[9-11]</sup>。随着越来越多的动态键被报道,双动态网络也应势而生<sup>[12]</sup>。通过将两种或多种不同类型的动态键相结合,可以实现材料在多种刺激下的调控,从而赋予材料更丰富的功能和更广泛的应用<sup>[13-18]</sup>。这种双重动态共价键策略不仅能够弥补单一动态键在响应性和应用范围上的局限性,还能够通过两种动态键的作用实现材料性能的优化和多功能化。

动态共价键聚合物通常对外部刺激(如温度、pH、光等)表现出显著的响应性<sup>[19-22]</sup>。流变学可以通过变温实验或化学环境调控来研究材料在不同刺激条件下的力学行为变化,揭示结构与性能的动态调控机制<sup>[23-27]</sup>。因此,流变学作为研究材料力学行为的核心工具,在动态共价聚合物的开发和应用中发挥着不可替代的作用<sup>[28,29]</sup>。

本文通过分子设计将动态亚胺键和蒽基团引入聚合物体系,构建了双重动态交联网络,并研究其光响应行为、流变动力学特性及力学性能。运用流变学测试和拉伸实验等表征该交联网络的动态行为和力学性能,探讨不同刺激条件(如光照、温度)对材料性能的影响,深入理解双重动态键在聚合物网络中的作用,以期为多功能智能材料的设计与优化提供理论依据和实验支持。

## 1 实验部分

### 1.1 原料和试剂

9-蒽甲醛、2-氨基-1,3-丙二醇、聚醚胺 D2000、二月桂酸二丁基锡(T-12):分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;六亚甲基二异氰酸酯(HDI):分析纯,上海迈瑞尔生化科技有限公司;四氢呋喃(THF)、乙醇(EtOH)、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,国药化学试剂有限公司。

### 1.2 测试与表征

流变测试:采用 MCR302 e 型旋转流变仪(奥地利安东帕公司)对双重动态键聚合物的流变性能进行测试。原位紫外固化扫描:将样品制成直径 15 mm、厚度 1 mm 左右的薄膜,用 PP15 的测量转子,底板用石英玻璃,将紫外光以恒定的强度照射到样品,使用振幅扫描模块,设置频率( $\omega$ )为 10 rad/s,应变为 1%,法向力为 5 N,观察储能模量( $G'$ )与损耗模量( $G''$ )随照射时间的变化;温度扫描:使用振幅扫描模块,设置  $\omega$  为 10 rad/s,应变为 1%,法向力为 5 N,升温速率为 2 °C/min,观察  $G'$ 和  $G''$ 随温度的变化;应力松弛测试:阶跃应变为 1%,测量过程中法向力设置为 5 N,观察松弛模量( $G_t$ )随时间的变化。

傅里叶变换红外光谱(FT-IR):采用 Nicolet iS50 型傅里叶变换红外光谱仪(美国赛默飞世尔科技公司)对光照及加热前后的双重动态键聚合物进行表征,波数为 4 000~600  $\text{cm}^{-1}$ 。

核磁共振氢谱( $^1\text{H-NMR}$ ):采用核磁共振波谱仪(AVANCE-NEO, Bruker),扫描频率为 400 MHz,氘代二甲基亚砜(DMSO)为溶剂,扫描次数为 16 次。

紫外-可见光吸收光谱(UV-Vis):在 Lambda950 紫外可见分光光度计上测定样品溶液经紫外辐照处理前、后的紫外-可见吸收光谱,测试波长为 200~400 nm。以 DMF 为溶剂,配制样品的质量浓度为 0.05 mg/mL,并转移至 10 mm 石英比色皿中进行光谱检测。样品溶液经 365 nm 波长的 LED 光源照射一定时间后,再测定其照射后的吸收特性。

力学性能: 根据 GB/T 1040.1—2018 制备哑铃型样条, 拉伸速率为 100 mm/min, 用万能试验机(中国珠海三思实验设备有限公司 CMT 1503 型)测试样品的力学性能。每种样品至少测试 5 次。

动态热力学性能(DMA): 采用中国教学仪器设备有限公司 Netzsch DMA242 E 型动态热力学性能分析仪进行 DMA 性能测试, 设定温度范围为  $-100 \sim 100$  °C, 升温速率为 3 °C/min, 测试频率为 10 Hz, 应变为 0.1%。在多频-应变模式下, 获得样品损耗角正切( $\tan \delta$ )随温度变化的关系曲线。

### 1.3 实验步骤

1.3.1 单体的制备 2-[(9-蒽亚甲基)氨基]-1,3-丙二醇(HEAIM)单体的合成路线如图 1 所示。首先, 将 10.3056 g 9-蒽甲醛和 4.8043 g 丝氨酸加入三口烧瓶中, 向烧瓶中加入 40 mL THF 和 80 mL EtOH 作为混合溶剂, 确保反应物充分溶解。随后, 升温至 60 °C, 搅拌反应 8 h, 冷凝回流。反应完成后将所得混合物抽滤, 固体产物在 50 °C 下烘 24 h, 即可得 HEAIM 单体。

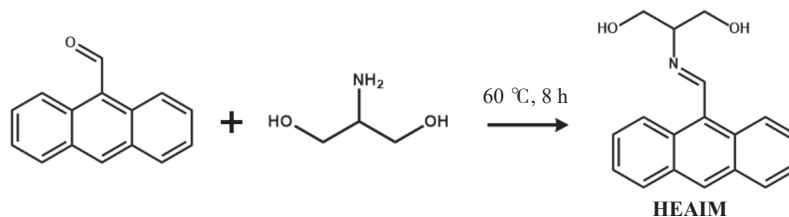


图 1 HEAIM 单体的合成

Fig. 1 Synthesis of HEAIM monomer

1.3.2 共聚物的制备 将单体 HEAIM(0.5594 g)与聚醚胺 D2000(16.0124 g)(聚醚胺 D2000 与 HEAIM 的物质的量之比为 4)加入三口烧瓶中, 在 120 °C 下减压 2 h 脱除水分, 然后降温至 50 °C, 加入 HDI(1.6815 g)与适量 DMF 溶剂, 在  $N_2$  环境中搅拌反应 3 h, 随后加入 1 滴 T-12 催化剂继续反应 10 min。将溶液注入聚四氟乙烯模具中, 在 80 °C 下烘 24 h, 之后进行脱膜, 最终得到含 9-蒽亚氨基-1,3-二羟基丙基侧链基团的聚醚胺-己二异氰酸酯型聚氨酯-脲(PUAIM)共聚物。PUAIM 共聚物的制备路线如图 2 所示。

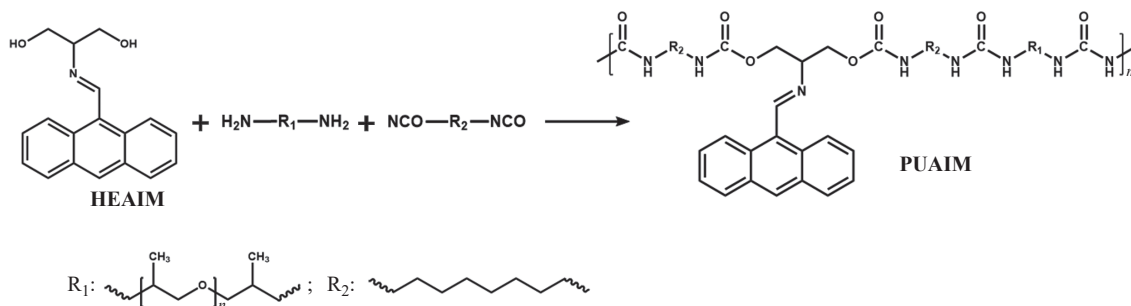


图 2 PUAIM 共聚物的制备路线

Fig. 2 Preparation route of PUAIM copolymer

1.3.3 光交联与解交联材料的制备 将 PUAIM 置于紫外光下分别照射 5, 10, 15, 20 min 可得到具有交联网络结构的样品。将交联样品在 160 °C 下进行高温处理可进行解交联。交联与解交联样品的制备路线如图 3 所示。

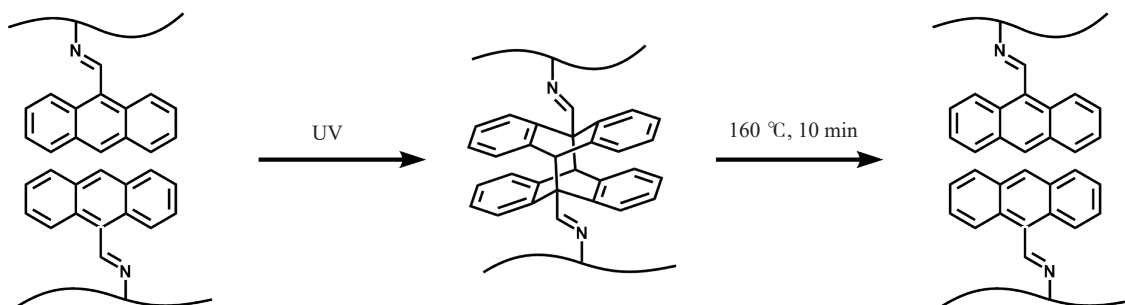


图 3 交联与解交联样品的制备路线

Fig. 3 Preparation routes for cross-linked and uncross-linked samples

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构分析

HEAIM 的<sup>1</sup>H-NMR 谱图如图 4 所示。在低场区域(化学位移 7.5~9.0)出现的多重峰归属于蒽环结构中的 H; 在化学位移 3.6 和 3.8 处的 2 个峰归属于 N 原子连接的—CH—和—CH<sub>2</sub>—, 同时在化学位移 4.8 处观察到羟基的特征峰。蒽环上的氢、氮原子连接的—CH—和—CH<sub>2</sub>—基团质子以及羟基的特征峰均清晰可见, 证明了 HEAIM 的成功合成。

不同紫外光照时间以及光照后再加热的 PUAIM 样品的 FT-IR 谱图如图 5 所示。在 3350 cm<sup>-1</sup> 处出现了 N—H 的伸缩振动, 证明体系中—NHCOO—基团的形成, 同时在 2270 cm<sup>-1</sup> 处未出现—NCO 的特征峰, 表明聚氨酯的成功合成, 且所有异氰酸根均参与反应。此外, 随着光照时间的延长, 在 734 cm<sup>-1</sup> 处 C—H(芳香环)弯曲振动发生变化, 表明光交联反应的成功发生。光照后再加热样品在 734 cm<sup>-1</sup> 处的峰强与未光照样品一致, 表明其内部交联结构可能消失, 出现了解聚。

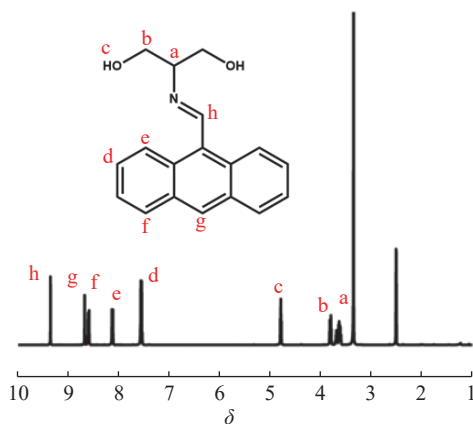


图 4 HEAIM 的<sup>1</sup>H-NMR 谱图  
Fig. 4 <sup>1</sup>H-NMR spectrum of HEAIM

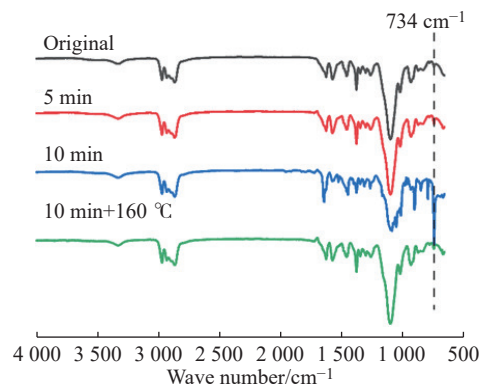


图 5 不同紫外光照时间以及光照后再加热的 PUAIM 样品的 FT-IR 谱图  
Fig. 5 FT-IR spectra of PUAIM samples with different UV irradiation time and reheating after illumination

### 2.2 光响应性分析

PUAIM 样品的紫外-可见光谱如图 6(a) 所示。在 300~400 nm 内可观察到 4 个特征吸收峰, 这些吸收峰与蒽基团的  $\pi$ - $\pi$  电子跃迁密切相关<sup>[30]</sup>。值得注意的是, 在 365 nm 紫外光持续辐照过程中, 上述特征吸收峰的强度呈现显著的衰减趋势, 并且在光照 15 min 后特征峰完全消失, 光交联反应基本完成, 这一现象为蒽基团的光交联行为提供了直接证据。

随着紫外光照时间的延长, 蒽基团间通过光二聚反应逐步形成交联网络结构, 这一过程导致其共轭体系的电子跃迁特性发生改变, 从而在光谱上表现为特征吸收峰的强度降低。实验结果表明, 蒽基团在紫外光下具有显著的光交联能力, 同时也可以通过调节紫外光照射时间来精确控制光交联反应的程度。

根据公式(1)可计算蒽基团的光转化率( $x$ )随光照时间的变化, 结果如图 6(b) 所示。该聚合物体系可成功进行光交联反应, 并且反应迅速, 几乎完全发生反应。

$$x = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $A_0$ 、 $A_t$  分别为光照时间为 0、 $t$  时的吸光度( $\lambda = 388$  nm)。

### 2.3 动态热力学性能

PUAIM 光照前后的损耗因子曲线如图 7 所示。光照后样品的玻璃化转变温度( $T_g$ )略微升高, 从光照前的 -51 °C 升高至 -49 °C, 这主要是由紫外光诱导的光交联反应引起的。在光照过程中, PUAIM 分子链上的蒽光敏基团发生光聚合反应, 形成新的共价交联点, 限制了链段的运动能力, 从而导致  $T_g$  升高。

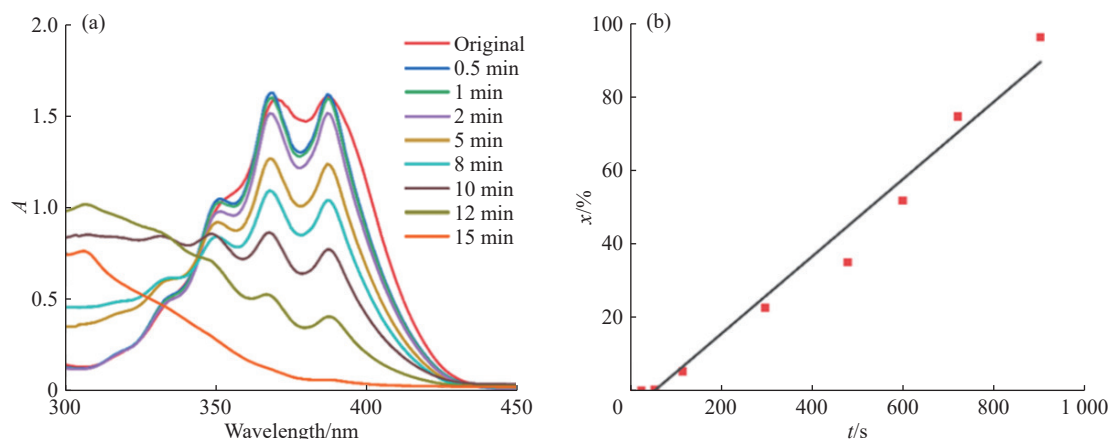


图 6 (a) PUAIM 经 365 nm 紫外光照射不同时间后的 UV-Vis 光谱图; (b) 波长 388 nm 处蒽基的光转化率与时间的关系

Fig. 6 (a) UV-Vis spectra of PUAIM irradiated by 365 nm UV light for different time; (b) Photoconversion yield of anthry group at 388 nm as a function of time

## 2.4 力学性能

PUAIM 样品在紫外光照射不同时间后的拉伸测试结果如图 8 和表 1 所示。随着光照时间的延长, 光交联反应逐步进行, 材料内部形成了共价交联网络, 显著增强了材料的刚性。交联密度的增大限制了分子链的运动能力和滑移行为, 导致杨氏模量逐渐增大, 光照 15 min 后, 杨氏模量从最初的 10.33 MPa 升高至 16.29 MPa, 同时断裂伸长率呈现下降趋势(从 167% 降低至 140%), 结构强度提升。光照 20 min 后, 杨氏模量升高至 17.52 MPa, 但材料脆性增强, 拉伸强度由 3.28 MPa 降低至 2.73 MPa, 断裂伸长率显著下降至 105%。

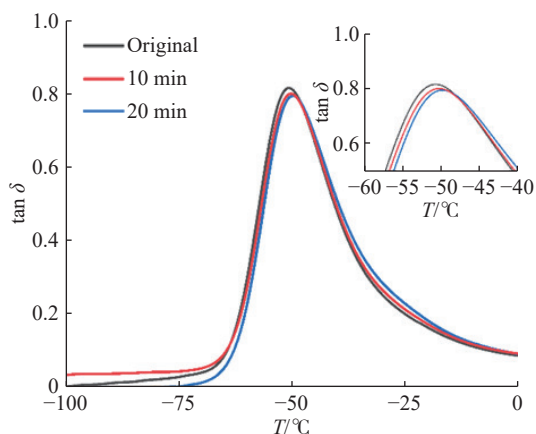


图 7 PUAIM 光照前后的损耗因子曲线

Fig. 7 Loss factor curves of PUAIM before and after UV light irradiation

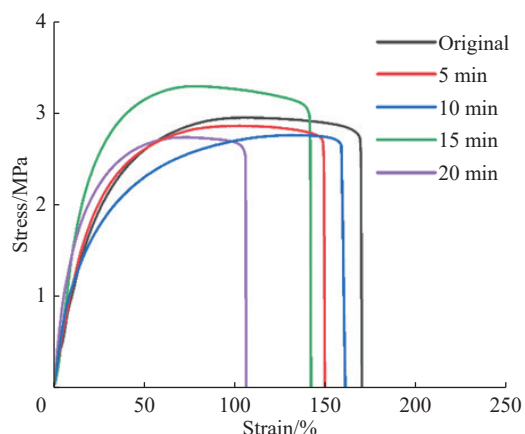


图 8 PUAIM 不同光照时间后的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of PUAIM after different irradiation time

表 1 不同光照时间后 PUAIM 样品的杨氏模量、拉伸强度以及断裂伸长率

Table 1 Young's modulus, tensile stress and elongation at break of PUAIM after different irradiation time

$t / \text{min}$	Young's modulus / MPa	Tensile stress / MPa	Elongation at break/%
0	10.33±0.56	2.95±0.15	167.0±8.7
5	10.58±0.63	2.86±0.14	148.0±7.4
10	11.31±0.55	2.76±0.11	158.0±8.2
15	16.29±0.97	3.28±0.19	140.0±6.6
20	17.52±1.12	2.73±0.15	105.0±5.7

## 2.5 流变性能

2.5.1 时间模量曲线分析 为了更全面地揭示材料在光刺激下的动态响应行为及其结构-性能关系, 本研究引

入了流变学表征手段, 以深入探究材料在动态条件下的力学行为及其光响应特性, 结果如图 9 所示。

从图 9(a)可以看出, 随着紫外光照射时间的增加,  $G'$  不断上升, 证明光交联反应的成功进行, 交联密度逐渐增大。在紫外光照射初期, 模量的变化较为明显, 显示出初期交联反应的快速进行。之后, 模量的增加速率减缓, 趋于平稳, 表明交联反应逐渐达到饱和状态。为进一步验证光交联反应的发生以及交联后样品的稳定性, 对照射 10 min 和 20 min 后的样品进行了时间扫描, 结果如图 9(b)与表 2 所示, 同样可以验证光交联反应的进行, 照射后的样品模量基本保持一致, 且  $G'$  和  $G''$  随照射时间的延长而逐渐升高, 与紫外光照测试结果一致, 交联后样品性质基本稳定。

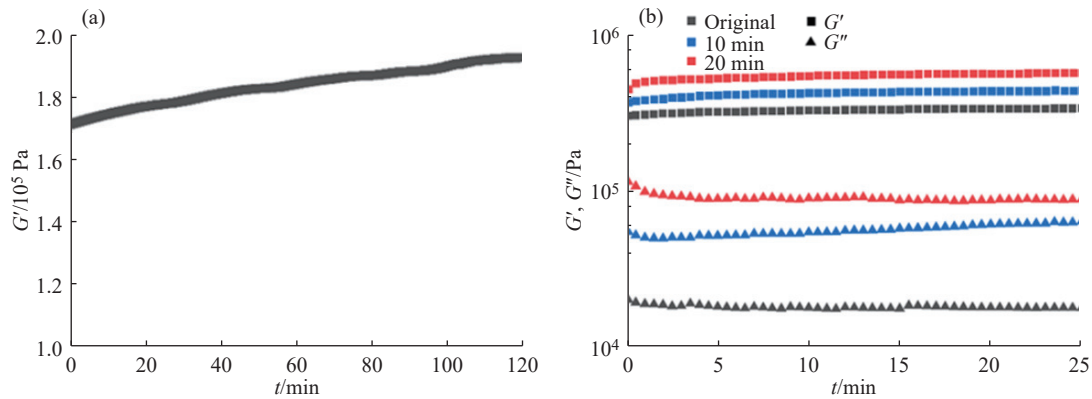


图 9 (a) PUAIM 在 365 nm 紫外线照射下储能模量随时间的变化; (b) PUAIM 不同光照时间后的时间-模量图  
Fig. 9 (a) Storage modulus curve of PUAIM under 365 nm UV light irradiation; (b) Time-modulus curves of PUAIM after different irradiation time

表 2 不同光照时间后 PUAIM 样品的  $G'$  和  $G''$   
Table 2  $G'$  and  $G''$  of PUAIM after different irradiation time

$t/\text{min}$	$G'/\text{Pa}$	$G''/\text{Pa}$
0	360 800±18 040	18 031±825
10	437 800±23 700	63 193±3 150
20	569 840±27 710	88 434±4 420

2.5.2 温度依赖性 为了研究材料的温度依赖性, 对初始 PUAIM 样品进行温度扫描, 结果如图 10 所示。光照 10 min 后样品的  $G'$  和  $G''$  显著高于初始样品, 这归因于光交联反应的发生, 导致材料内部交联密度增加。随着温度的升高, 初始样品与光照后样品的  $G'$  和  $G''$  总体呈现降低的趋势, 表明材料在高温下链段运动性增强, 从而模量下降。在 95 °C 附近, 2 种样品的模量均出现显著下降, 这一现象可能与动态亚胺键的活化有关<sup>[31]</sup>。动态亚胺键在高温下开始更为剧烈的动态交换, 导致材料内部链段运动性增强, 从而引起模量的急剧降低。光照后样品的模量变化曲线相对平滑且延迟, 在更高的温度范围依然保持较高的模量, 这可能归因于高度的交联程度, 生成的光交联键相对动态亚胺键提供了更强的结构约束。此外, 在 142 °C 附近, 光照后样品的模量出现另一个明显的拐点, 模量迅速下降。这一现象可能与光交联结构的解聚有关, 表明材料在高温下逐渐由交联结构转变为非交联结构, 从而导致模量的进一步显著降低。因此, 光照处理显著提升了 PUAIM 材料的热稳定性, 但其高温性能仍受动态亚胺键和光交联结

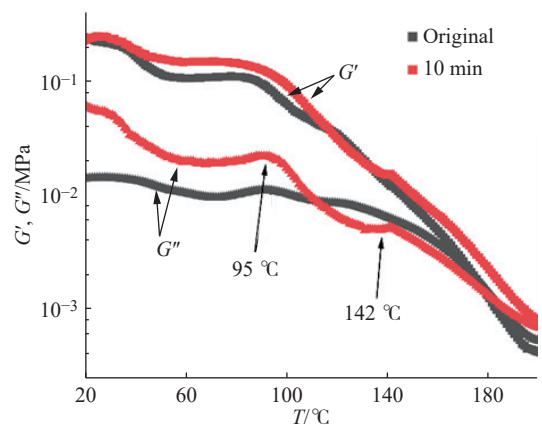


图 10 PUAIM 光照前后的温度依赖性  
Fig. 10 Temperature dependence of PUAIM before and after UV light irradiation

构约束。此外, 在 142 °C 附近, 光照后样品的模量出现另一个明显的拐点, 模量迅速下降。这一现象可能与光交联结构的解聚有关, 表明材料在高温下逐渐由交联结构转变为非交联结构, 从而导致模量的进一步显著降低。因此, 光照处理显著提升了 PUAIM 材料的热稳定性, 但其高温性能仍受动态亚胺键和光交联结

构的共同影响。

**2.5.3 应力松弛** 为了进一步探究材料的动态行为及其在不同温度条件下的力学响应,系统研究了光交联前后材料的应力松弛行为,结果如图11所示。通过对比分析,可以清晰地观察到光交联对材料应力松弛行为的显著影响,尤其是在不同温度下的松弛模量变化和链段运动特性。从图11(a)可以看出,对于未交联样品,在低温条件(40 °C 和 60 °C)下,  $G_t$  较高,表明材料刚性较强,链段运动性受到限制。随着温度的升高,  $G_t$  逐渐下降,聚合物链的活动性增强,特别是在 100 °C 时,  $G_t$  显著降低。这一现象可能与材料内部动态亚胺键的快速交换有关。当温度进一步升高至 140 °C 时,  $G_t$  迅速下降,几乎趋近于零,表明材料已达到其黏流温度,表现出明显的流动性。如图11(b)所示,光交联后的样品在低温(40 °C 和 60 °C)下同样表现出较高的  $G_t$ ,材料刚性较强,链段运动性较低,并且由于交联结构的存在,其模量显著高于未交联样品。随着温度升高,  $G_t$  逐渐下降,在 100 °C 时,聚合物链活动性增强,内部动态亚胺键发生快速交换。当温度进一步升至 140 °C 时,光交联样品仍保持相对较高的  $G_t$ ,而未交联样品在相同温度下  $G_t$  显著下降,表明光交联材料在高温下具有更好的热稳定性。当温度升至 160 °C 后,光交联结构开始发生解聚,交联网络逐渐破坏,  $G_t$  显著下降,材料逐渐进入黏流状态。总体而言,光交联显著改善了材料在高温下的力学性能,交联网络有效提高了材料的热稳定性;然而,在更高温下(如 160 °C)下,光交联结构会逐渐消失,材料发生黏流,这一现象与光交联结构的热可逆性密切相关。尽管这种特性在一定程度上限制了材料在高温环境下的长期稳定性,但它也为材料的再加工和循环利用提供了可能性。

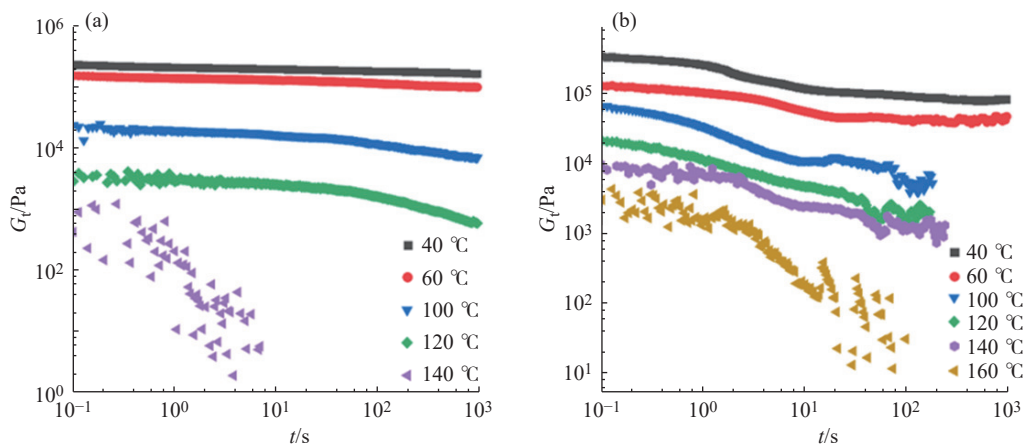


图 11 PUAIM (a) 光照前和 (b) 光照后在不同温度下的应力松弛曲线

Fig. 11 Stress relaxation curves of PUAIM at different temperatures (a) before and (b) after UV light irradiation

### 3 结 论

(1)设计并制备了含有亚胺键和意的双重动态交联弹性体材料。蒽基团在紫外光照射下发生光二聚反应,在弹性体内部形成交联结构,提升了材料的刚性和强度,实现了紫外光对材料性能的调控。

(2)光交联后材料的玻璃化转变温度略微升高,且在高温下表现出更高的模量和黏流温度,以及更好的结构稳定性。

(3)光交联后样品在温度扫描中出现 2 个拐点(95 °C 和 142 °C),直接揭示了其内部动态亚胺键交换与光交联结构解聚的不同温度响应性,表明了双重动态键聚合物网络的多重响应能力。

#### 参考文献:

- [ 1 ] CROMWELL O R, CHUNG J, GUAN Z. Malleable and self-healing covalent polymer networks through tunable dynamic boronic ester bonds [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(20): 6492-6495.
- [ 2 ] 陈峰, 候宇坤, 赵赛. 一种硼酸酯动态交联环氧树脂的合成与性能 [J]. *化工学报*, 2019, 70(11): 4449-4456.  
CHEN F, HOU Y K, ZHAO Q. Synthesis and properties of a boronic-ester dynamically cross-linked epoxy resin [J]. *Journal of*

- Chemical Industry and Engineering (China), 2019, 70(11): 4449-4456.
- [ 3 ] XIAO Y, LIU P, WANG W J, LI B G. Dynamically cross-linked polyolefin elastomers with highly improved mechanical and thermal performance [J]. *Macromolecules*, 2021, 54(22): 10381-10387.
- [ 4 ] 吴艳玲, 周强, 罗清元, 郑新蕾, 唐茜, 李璇, 张海军. 基于动态键的自修复聚氨酯弹性体材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2024, 38(S2): 558-571.
- WU Y L, ZHOU Q, LUO Q Y, ZHENG X L, TANG Q, LI X, ZHANG H J. Research progress on self-healing polyurethane elastomer materials based on dynamic bonds [J]. *Materials Review*, 2024, 38(S2): 558-571.
- [ 5 ] LENDLEIN A, JIANG H, JÜNGER O, LANGER R. Light-induced shape-memory polymers [J]. *Nature*, 2005, 434(7035): 879-882.
- [ 6 ] 陈恩恩, 周建, 朱健. 自修复聚氨酯的研究进展 [J]. *功能高分子学报*, 2024, 37(6): 526-548.
- CHEN S S, ZHOU J, ZHU J. Progress in self-healing polyurethanes [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2024, 37(6): 526-548.
- [ 7 ] 徐鸿涛, 沈勇, 潘虹, 徐丽慧. 基于动态可逆共价键的自愈含水凝胶的制备及应用研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2023, 51(11): 87-92.
- XU H T, SHEN Y, PAN H, XU L H. Recent advances in preparation and application of self-healing hydrogels based on dynamic reversible covalent bonds [J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(11): 87-92.
- [ 8 ] LIU Z, TANG Y, CHEN Y, LU Z, RUI Z. Dynamic covalent adhesives and their applications: Current progress and future perspectives [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154710.
- [ 9 ] 谢美昌, 刘悦洋, 向洪平, 章明秋. 基于动态共价化学的弹性体可控降解与回收研究进展 [J]. *功能高分子学报*, 2025, 38(1): 1-12.
- XIE M C, LIU Y Y, XIANG H P, ZHANG M Q. Research progress on controllable degradation and recycling of elastomers based on dynamic covalent chemistry [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2025, 38(1): 1-12.
- [10] SINGH D. Dynamic covalent macromolecular networks for adaptive drug delivery systems: An informative review [J/OL]. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, (2024-12-13)[2025-05-11]. <https://doi.org/10.1080/00222348.2024.2441051>.
- [11] ZHU G, HOUCK H A, SPIEGEL C A, SELHUBER-UNKEL C, HOU Y, BLASCO E. Introducing dynamic bonds in light-based 3D printing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(20): 2300456.
- [12] 叶娟, 祖兆基, 林子谦, 向洪平, 章明秋. 本征型自修复聚硅氧烷材料: 从单重动态交联网络到多重动态交联网络 [J]. *高分子学报*, 2023, 54(7): 1028-1054.
- YE J, ZU Z J, LIN Z Q, XIANG H P, ZHANG M Q. Intrinsic self-healing polysiloxane materials: From single dynamic cross-linked networks to multiple dynamic cross-linked networks [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2023, 54(7): 1028-1054.
- [13] 张震宇, 吕静, 仲家慧, 石碧茹, 孙莹璐, 谢昊圃, 田新欣, 刘向东, 杨宇明. 双动态键自修复聚氨酯研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(8): 146-151.
- ZHANG Z Y, LYU J, ZHONG J H, SHI B R, SUN Y L, XIE H P, TIAN X X, LIU X D, YANG Y M. Research progress on self-healing polyurethanes with dual dynamic bonds [J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(8): 146-151.
- [14] ZEGOTA M M, MÜLLER M A, LANTZBERG B, KIZILSAVAS G, COELHO J A S, MOSCARIELLO P, MARTÍNEZ-NEGRO M, MORSBACH S, GOIS P M P, WAGNER M, NG D Y W, KUAN S L, WEIL T. Dual stimuli-responsive dynamic covalent peptide tags: Toward sequence-controlled release in tumor-like microenvironments [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, 143(41): 17047-17058.
- [15] FU X, HOSTA-RIGAU L, CHANDRAWATI R, CUI J. Multi-stimuli-responsive polymer particles, films, and hydrogels for drug delivery [J]. *Chem*, 2018, 4(9): 2084-2107.
- [16] 童艳萍, 肖艳. 双重动态化学键交联水凝胶的制备及性能 [J]. *功能高分子学报*, 2020, 33(3): 305-312.
- TONG Y P, XIAO Y. Preparation and properties of hydrogels cross-linked by dual dynamic chemical bonds [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2020, 33(3): 305-312.
- [17] 田丽蓉, 杨莉, 王占华, 夏和生. 含双重动态键的可重加工及室温自修复聚氨酯弹性体 [J]. *高分子学报*, 2019, 50: 527-534.
- TIAN L R, YANG L, WANG Z H, XIA H S. Reprocessable and room-temperature self-healing polyurethane elastomers containing dual dynamic bonds [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2019, 50: 527-534.
- [18] JIN B, SONG H, JIANG R, SONG J, ZHAO Q, XIE T. Programming a crystalline shape memory polymer network with thermo- and photo-reversible bonds toward a single-component soft robot [J]. *Science Advances*, 2018, 4(1): eaao3865.
- [19] 马清杰, 李亮, 张彦峰, 耿云鹏, 李军. 含硫动态高分子的研究进展 [J]. *功能高分子学报*, 2024, 37(1): 66-81.
- MA Q J, LI L, ZHANG Y F, GENG Y P, LI J. Research progress on sulfur-containing dynamic polymers [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2024, 37(1): 66-81.
- [20] KLOXIN C J, SCOTT T F, ADZIMA B J, BOWMAN C N. Covalent adaptable networks (CANs): A unique paradigm in cross-linked

- polymers [J]. *Macromolecules*, 2010, 43(6): 2643-2653.
- [21] 张欢, 杨是佳, 刘文星, 乔志, 阳珠生, 赵宁, 朱才镇, 徐坚. 动态聚合物及其特殊性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(1): 261-266,291.  
ZHANG H, YANG S J, LIU W X, QIAO Z, YANG Z S, ZHAO N, ZHU C Z, XU J. Dynamic polymers and their special properties [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(1): 261-266,291.
- [22] 慕蓉, 任浩浩, 龚雪艳, 孙初锋, 李佳. 光响应聚合物的结构动态调控 [J]. *山东化工*, 2024, 53(12): 100-103,109.  
MU R, REN H H, GONG X Y, SUN C F, LI J. Structural dynamic regulation of light-responsive polymers [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2024, 53(12): 100-103,109.
- [23] 谢欣宇, 谢星雨, 张凡, 郑宗宜, 方华高, 丁运生. 类玻璃高分子流变学研究进展 [J]. *高分子通报*, 2025(2): 1-19.  
XIE X Y, XIE X Y, ZHANG F, ZHENG Z Y, FANG H G, DING Y S. Research progress on rheology of glass-like polymers [J]. *Polymer Bulletin*, 2025(2): 1-19.
- [24] PORATH L E, EVANS C M. Importance of broad temperature windows and multiple rheological approaches for probing viscoelasticity and entropic elasticity in vitrimers [J]. *Macromolecules*, 2021, 54(10): 4782-4791.
- [25] SHI W, ZHOU T, HE B, HUANG J, LIU M. Dynamic-bond-mediated chain reptation enhances energy dissipation of elastomers [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(19): e202401845.
- [26] CHENG L, ZHAO J, XIONG Z, LIU S, YAN X, YU W. Hyperbranched vitrimer for ultrahigh energy dissipation [J]. *Angewandte Chemie*, 2024, 136(28): e202406937.
- [27] CHUANG H K, HAN C D. Rheological behavior of polymer blends [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1984, 29(6): 2205-2229.
- [28] RICARTE R G, SHANBHAG S. A tutorial review of linear rheology for polymer chemists: Basics and best practices for covalent adaptable networks [J]. *Polymer Chemistry*, 2024, 15(9): 815-846.
- [29] 许梦丽, 王浩, 刘志华, 文鹏, 符杨康, 谢娇, 陈茂. 聚乙烯醇与硼酸改性醋酸纤维素的性能 [J]. *功能高分子学报*, 2024, 37(6): 509-515.  
XU M L, WANG H, LIU Z H, WEN P, FU Y K, XIE J, CHEN M. Properties of cellulose acetate modified with polyvinyl alcohol and boric acid [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2024, 37(6): 509-515.
- [30] 刘海超, 高宇, 杨兵. 基于蒽的高效率  $\pi$ - $\pi$  作用双分子发光: 激基缔合物再认识 [J]. *科学通报*, 2017, 62(35): 4099-4112.  
LIU H C, GAO Y, YANG B. Highly efficient  $\pi$ - $\pi$  interaction bimolecular emission based on anthracene: Re-understanding excimers [J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(35): 4099-4112.
- [31] MIAO J T, GE M, PENG S, ZHONG J, LI Y, WENG Z, WU L, ZHENG L. Dynamic imine bond-based shape memory polymers with permanent shape reconfigurability for 4D printing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40642-40651.

(责任编辑: 刘亚萍)