

UV固化有机硅改性丙烯酸胺型聚合物的合成及性能研究

黄 帅*, 刘 波, 孙平昌, 阿不都热合曼·乌斯曼[#]

新疆师范大学化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年4月11日; 录用日期: 2025年5月14日; 发布日期: 2025年5月23日

摘 要

首先在低温条件下合成N-(3-羟丙基)丙烯酰胺(HPAA), 与氯硅烷以简单的方法合成了五种不同结构的丙烯酸胺型有机硅预聚体SPAA。然后在紫外光源下对SPAA进行光固化得到聚合物SPAAP。对预聚体和聚合物通过核磁共振氢谱(¹H-NMR)和红外光谱(FT-IR)等方法进行表征。最后对聚合物SPAAP的玻璃化转变温度、交联度、附着力、硬度、耐水性、耐酸碱性和可见光透过率等性能进行测试。结果表明: 光固化聚合物SPAAP (1)~(5)的交联度均较高(97~99%), 在玻璃化转变温度、交联度、附着力、硬度、耐水性、耐酸碱性和可见光透过率等性能上都表现良好; 其中聚合物SPAAP (1)的硬度最高(1H), SPAAP (2)的可见光透过率最高(92%), SPAAP (4)具有最好的耐水性、耐酸碱性和SPAAP (5)的玻璃化转变温度最高(212.01℃)等。

关键词

丙烯酸胺, 紫外光固化, 有机硅聚合物, 热性能

Synthesis and Properties of UV-Curable Organosilicon-Modified Acrylamide Polymers

Shuai Huang*, Bo Liu, Pingchang Sun, Abudurehman Wusiman[#]

College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi Xinjiang

Received: Apr. 11th, 2025; accepted: May 14th, 2025; published: May 23rd, 2025

*第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 黄帅, 刘波, 孙平昌, 阿不都热合曼·乌斯曼. UV 固化有机硅改性丙烯酸胺型聚合物的合成及性能研究[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(3): 140-150. DOI: 10.12677/hjct.2025.153013

Abstract

Firstly, *N*-(3-hydroxypropyl)acrylamide (HPAA) was synthesized under low-temperature conditions, and five acrylamide-type organosilicon prepolymers (SPAA) with different structures were synthesized from HPAA and chlorosilane by a simple method. Then, the SPAA prepolymers were photocured under an ultraviolet light source to obtain the polymers (SPAAP). The prepolymers and polymers were characterized by methods such as proton nuclear magnetic resonance ($^1\text{H-NMR}$) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). Finally, the properties of the polymer SPAAP, including glass transition temperature, crosslinking degree, adhesion, hardness, water resistance, acid and alkali resistance, and visible light transmittance, were tested. The results showed that The photocured polymers SPAAP (1)~(5) all exhibited high crosslinking degrees (97~99%) and demonstrated excellent performance in multiple properties, including glass transition temperature, crosslinking density, adhesion, hardness, water resistance, acid/alkali resistance, and visible light transmittance. Among them, polymer SPAAP (1) had the highest hardness (1H), polymer SPAAP (2) had the highest visible light transmittance (92%), polymer SPAAP (4) had the best water resistance and acid-alkali resistance, and polymer SPAAP (5) had the highest glass transition temperature (212.01°C).

Keywords

Acrylamide, UV-Curable, Silicone Polymers, Thermal Performance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

紫外光固化技术是一种利用紫外光的能量使光引发剂生成自由基[1], 令低分子预聚物或单体发生聚合及交联固化的新型技术。这种区别于传统热固化技术的生产工艺, 可以使紫外光固化单体无需加热且极短时间内就可以完成固化[2], 从而大幅减少生产时间和能源消耗。不仅如此, 紫外光固化材料体系中不需要添加有机溶剂, 在减少环境污染的同时也减少了生产成本[3]。因此, 紫外光固化技术是一项符合“5E”原则, 即高生产效率(Efficient)、绿色环保(Enviromentalfriendly)、应用性广(Enabling)、经济低成本(Economic)、节约能量(Energysaving)的生产方式, 在涂料[4]、胶粘剂[5]、3D 打印材料[6]、电子封装材料[7]等化工行业中具有广阔的应用前景。

丙烯酰胺类化合物具有一定优异的性能[8], 并被广泛应用于污染防治[9]、医疗卫生[10]、衣物染料[11]、粘合剂[12]等方面, 但是光固化后的丙烯酰胺类材料存在着明显的力学及热性能上的缺陷, 如: 成型物脆, 易变形, 耐温性差等[13]。同时, 有机硅化合物因其独特的结构而在表面能、低温柔韧性、电绝缘性、耐热、耐氧化、耐候性、疏水性、耐化学试剂等方面普遍具有优异的性能[14]。但是使用有机硅改性丙烯酰胺型聚合物并进行光固化的有关研究较少。本文先以丙烯酰氯和 3-氨基-丙醇在低温条件下合成得到 *N*-(3-羟丙基)丙烯酰胺(HPAA) [15]; 再以 *N*-(3-羟乙基)丙烯酰胺和不同结构的氯硅烷为原料通过简单的方法进行反应, 合成了不同的预聚体 SPAA (1)~(5); 然后在紫外光下进行固化得到了有机硅改性丙烯酰胺型光固化聚合物 SPAAP (1)~(5), 其合成路线如图 1 所示。最终测试了 SPAAP (1)~(5)的玻璃化转变温度、交联度、附着力等级、铅笔硬度、耐水性、耐酸碱性、可见光透过率等性能。

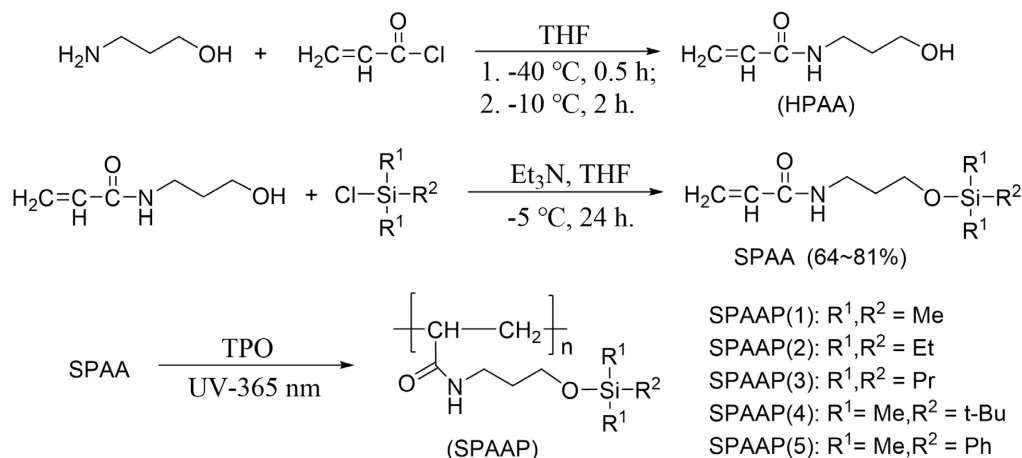


Figure 1. Preparation of light-curing polymer SPAAP

图 1. 光固化聚合物 SPAAP 的制备

2. 实验

2.1. 主要原料

丙烯酰氯: 98%, 安耐吉;
 3-氨基-丙醇: 98%, 安耐吉;
 三乙胺: 99%, 阿达玛斯;
 三甲基氯硅烷: 99%, 阿达玛斯;
 三乙基氯硅烷: 98%, 阿达玛斯;
 三丙基氯硅烷: 98%, 阿达玛斯;
 叔丁基二甲基氯硅烷: 99%, 阿达玛斯;
 氯(二甲基)苯基硅烷: 98%, 阿达玛斯;
 (2,4,6-三甲基苯甲酰基)二苯基氧化膦(TPO), 99%, 毕得医药。

2.2. 主要仪器及设备

核磁共振仪: AVANCE 400, 布鲁克光谱仪器有限公司;
 红外光谱仪: TENSOR27, 布鲁克光谱仪器有限公司;
 紫外光源: UVSF81T, 北京复坦希电子科技有限公司;
 差示扫描量热分析仪: HNB-DSC300C, 厦门宇特思仪器有限公司;
 手摇铅笔硬度测试仪: QHQ-A, 浙江艾锐普仪器有限公司;
 紫外-可见分光光度计: Hitachi U-3310, 日立公司。

2.3. 光固化聚合物的制备

2.3.1. 原料 *N*-(3-羟丙基)丙烯酰胺(HPAA)的制备

10 g (110 mmol) 丙烯酰氯溶解于 50 mL THF, 16.6 g (220 mmol) 3-氨基-丙醇溶解于 120 mL THF, 分别降温至 $-40\text{ }^\circ\text{C}$; 3-氨基-丙醇放入 250 mL 三颈烧瓶, 插入温度计, 放置于恒温槽; 丙烯酰氯溶液放于恒压滴液漏斗, 缓慢滴加, 0.5 h 左右滴加结束; 加入食盐水制冰使温度控制在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 反应 2 h; 反应结束后, 低温下旋蒸除去溶剂, 浓缩得到淡青色透明液体 11.41 g, 产率 80%。

2.3.2. 预聚体 SPAA 的制备

将 100 mL 两颈烧瓶抽真空充氮气，装上氮气球；用注射器分别加入 1.1 g (8.8 mmol) *N*-(3-羟丙基)丙烯酰胺(HPAA)和 1.3 g 三乙胺，溶解于 20 mL 四氢呋喃中；然后将 8.8 mmol 的氯硅烷溶解于 10 mL 的四氢呋喃中并在冰浴中缓慢注射到反应器；控制冰浴温度为 -5°C 继续反应 24 h。反应结束，旋蒸除去溶剂四氢呋喃，使用二氯甲烷溶解，过量饱和碳酸氢钠溶液洗涤三次，饱和食盐水洗涤三次，无水硫酸钠干燥，旋蒸后可得到淡黄色和无色的透明液态预聚体 SPAA (1)~(5)，产率为 64%~81%。

2.3.3. 光固化聚合物 SPAAP 的制备

在室温下，分别向预聚体 SPAA (1)~(5)中加入 1%的光引发剂 TPO，在避光条件下溶解。随后，将溶液倒入自制模具中，并用 100 W 紫外光源(波长 360 nm)在距离 10 cm 的位置进行固化。观察聚合物的流动性，并用手指轻触表面。如果表面光滑或仅留有汗液，则表明固化已完全，此时记录下固化时间[16]。随后，将聚合物置于 50°C 的真空环境中进行干燥，以去除其中少量气泡，最终得到乳白色至无色透明的固态光固化聚合物 SPAAP (1)~(5)。

2.4. 性能测试

2.4.1. 玻璃化转变温度的测试

称量 15 mg 聚合物样品，在坩埚中按压紧实以充分接触坩埚底部；差示扫描量热分析仪(DSC)的氮气流量调为 50 mL/min、升温速率调为 10 K/min，在 35°C ~ 250°C 对样品进行玻璃化转变温度的测试。

2.4.2. 交联度的测试

按照国标 GB/T 36965-2018 [17]的方法，称量交联前后的样品 5 mg~10 mg 放入坩埚；差示扫描量热分析仪(DSC)的氮气流量调为 50 mL/min、升温速率调为 10 K/min，在 25°C ~ 225°C 分别对样品进行测试，按照如下公式进行计算得到交联度 G ：

$$G = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100\%$$

以上公式为交联度的计算(Calculation of the degree of crosslinking)。

式中：

G ——交联度，用百分数表示；

H_1 ——未交联样品的热焓值，单位为 J/g；

H_2 ——交联样品的剩余热焓值，单位为 J/g。

2.4.3. 附着力的测试

按照国标 GB/T 9286-2021 [18]的方法，将固体样品表面使用美工刀划出均匀深浅的 1 mm × 1 mm 小格，在小格位置固定 3 M 胶带并尽量排出空气后，以 60° 的角度快速撕离胶带，观察固体样品表面并与标准面比较、分级。

2.4.4. 硬度的测试

按照国标 GB/T 6739-2022 [19]进行测试。将固体样品固定在装有铅笔的硬度测试仪下，匀速缓慢推进，测试范围为 6 B~6 H。

2.4.5. 耐水性的测试

按照国标 GB/T 1733-1993 [20]进行测试。将固体样品完整浸入去离子水中 48 h，干燥后观察固体样品表面。

2.4.6. 耐酸碱性的测试

按照国标 GB/T 9274-1988 [21]进行测试。分别将固体样品完整浸入 10% NaOH 溶液、10% HCl 溶液中 48 h, 干燥后观察固体样品表面。

2.4.7. 可见光透过率的测试

在相同的模具中得到厚度大小相同的薄膜型样品, 使用紫外-可见分光光度计在 400 nm~800 nm 范围内进行可见光透过率的测试。

3. 结果与讨论

3.1. 原料 HPAA 的结构表征

图 2 所示为原料 HPAA 的 ^1H NMR 谱图, 由图 2 可知成功合成原料 HPAA。其中化学位移值(δ/ppm) 在 $\delta \approx 5.5\sim 6.5$ ppm 的三个多重峰属于 $\text{CH}_2=\text{CH}$, $\delta \approx 7.1$ ppm 的单峰属于 $-\text{NH}-$, $\delta \approx 4.1$ ppm 的单峰属于 $-\text{OH}$, 化学位移值在 $\delta \approx 3.7$ ppm 的三重峰、 $\delta \approx 3.4$ ppm 的四重峰、 $\delta \approx 1.7$ ppm 的五重峰分别属于 $-\text{NH}-$ 和 $-\text{OH}$ 间的三个 CH_2 。

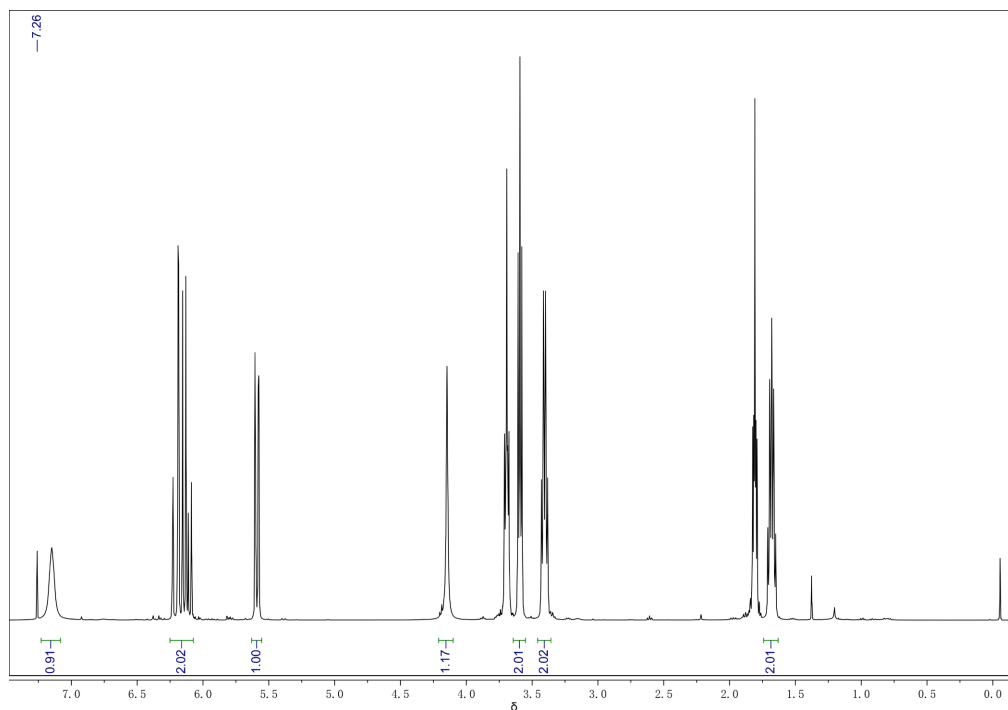


Figure 2. ^1H NMR profile of raw HPAA

图 2. 原料 HPAA 的 ^1H NMR 图谱

3.2. 预聚体 SPAA 的结构表征

3.2.1. 核磁共振氢谱(^1H -NMR)

图 3 为预聚体 SPAA (1)~(5)的 ^1H -NMR 谱图, 由图 3 可知预聚体 SPAA (1)~(5)已成功合成, 其化学位移值在 $\delta \approx 5.5\sim 6.5$ ppm 的三个多重峰属于 $\text{CH}_2=\text{CH}$, 在 $\delta \approx 3.7$ 的三重峰、 $\delta \approx 3.4$ 的四重峰、 $\delta \approx 1.7$ 的五重峰分别属于 $-\text{NH}-$ 和 $-\text{OH}$ 间的三个 CH_2 。预聚体 SPAA (1)~(4)的谱图中与 Si 相连的烷基氢化学位移值在 0~1.8 ppm 之间。预聚体 SPAA(5)分子中与 Si 相连的苯基氢化学位移为 7.3 ppm~7.6 ppm 之间。

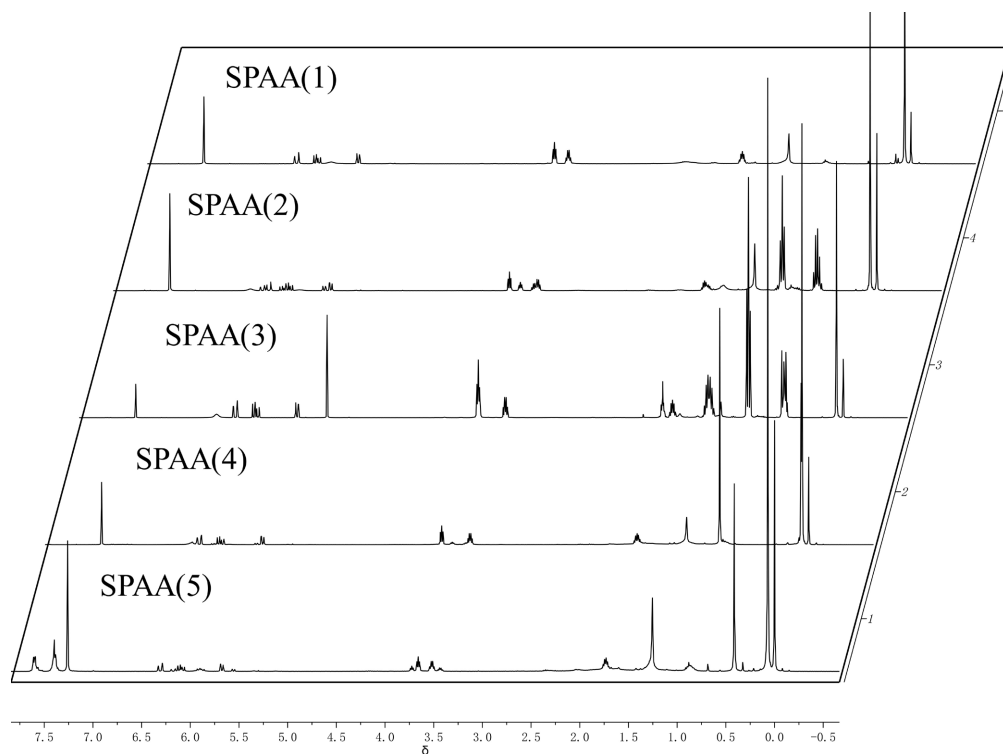


Figure 3. ^1H NMR profile of the prepolymer SPAA

图 3. 预聚体 SPAA 的 ^1H NMR 图谱

3.2.2. 红外光谱(FT-IR)

图 4 为预聚体 SPAA (1)~(5) 的红外谱图, 由图 4 可知, 1100cm^{-1} 处为 Si-O 键的伸缩振动峰, 这证明了预聚体 SPAA 的成功合成; 3300cm^{-1} 处为 N-H 键的伸缩振动峰, 3080cm^{-1} 处为不饱和 C-H 键的伸缩振动峰, 1700cm^{-1} 处为 C=O 键(酰胺)的伸缩振动峰, 1620cm^{-1} 处为 C=C 键的伸缩振动峰。

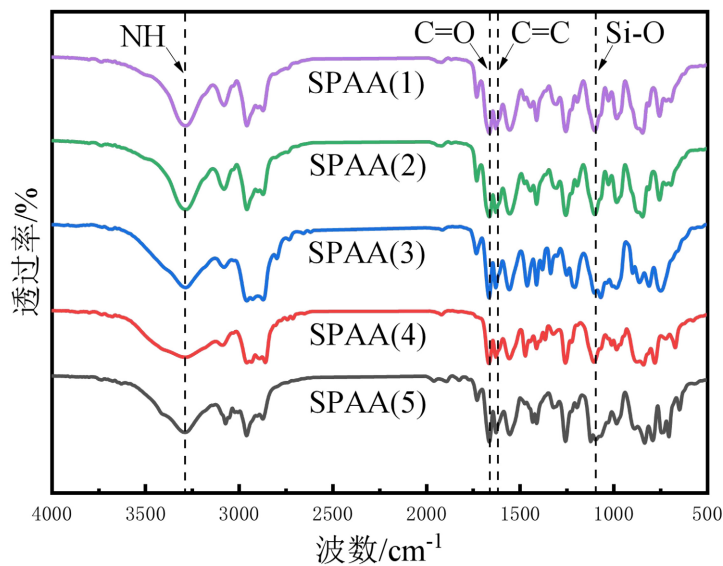


Figure 4. Infrared spectrum of prepolymer SPAA

图 4. 预聚体 SPAA 的红外图谱

3.3. 聚合物 SPAAP 的结构表征

图 5 为聚合物 SPAAP(1)~(5)的红外谱图,由图 5 可知,聚合物 SPAAP(1)~(5)在 1625 cm^{-1} 处的 $\text{C}=\text{C}$ 键的伸缩振动峰都完全消失,在 3100 cm^{-1} 处的不饱和 $\text{C}-\text{H}$ 键的伸缩振动峰吸收强度有不同程度的降低。这可以表明预聚体中的 $\text{C}=\text{C}$ 键在光引发剂 TPO 存在条件下,紫外光下发生聚合反应生成光固化聚合物 SPAAP(1)~(5)。

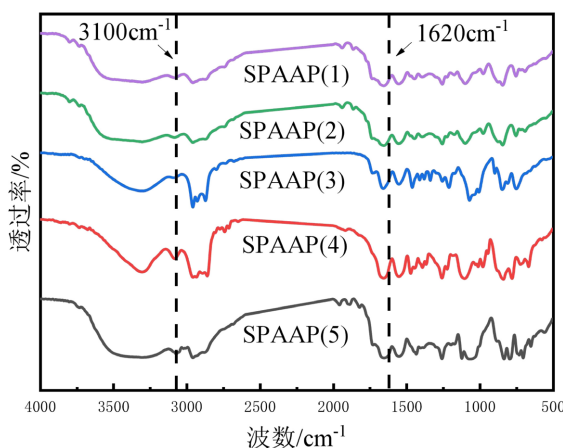


Figure 5. Infrared spectrum of polymer SPAAP

图 5. 聚合物 SPAAP 的红外图谱

3.4. 聚合物 SPAAP 的交联度

从聚合物 SPAAP 在固化前后的 DSC 分析图(以图 6 为例)可以得到聚合物交联前后的热焓值 H_1 和剩余热焓值 H_2 , 通过计算得到聚合物 SPAAP 的交联度 G 。各预聚体在光固化条件下(100 W, 1%TPO)发生反应生成交联度较高的聚合物。由表 1 可知,聚合物 SPAAP(1)~(5)的交联度 G 均保持在高水平(97%~99%),显示材料体系具有稳定的三维网络结构,且聚合物的结构对交联度有一定的影响。聚合物 SMAAP(3)具有最高的交联度,这是因为其分子中的三丙基结构具有的空间位阻可以进行充分的聚合反应。

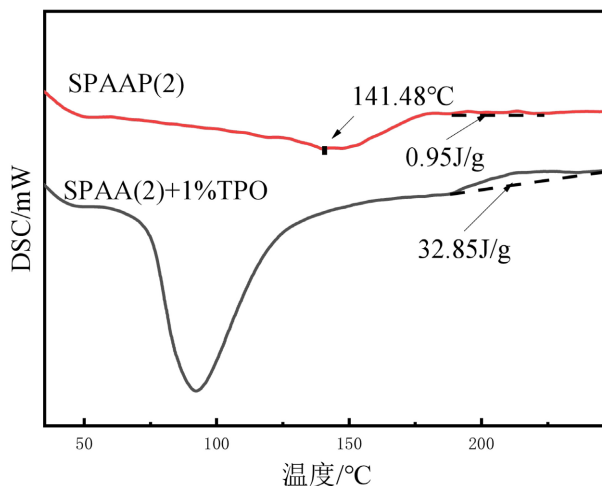


Figure 6. DSC spectra of polymer SPAAP (2)

图 6. 聚合物 SPAAP (2)的 DSC 谱图

Table 1. Crosslinking degree of polymer SPAAP
表 1. 聚合物 SPAAP 的交联度

聚合物	交联度 G
SPAAP (1)	98%
SPAAP (2)	97%
SPAAP (3)	99%
SPAAP (4)	98%
SPAAP (5)	98%

3.5. 聚合物 SPAAP 的热性能分析

如图 7 所示，在聚合物 SPAAP (1)~(5)都具有较高且相近交联度的情况下，各个聚合物的玻璃化转变温度出现了显著差异(76.5℃~197.8℃)，这表明侧链结构对玻璃化转变温度起决定性作用。侧链为三丙基的聚合物 SPAAP (3)展现出最低玻璃化转变温度(76.5℃)，这是因为长链烷基的空间舒展性导致自由体积增加，分子的链段运动阻碍小。相反，侧链为叔丁基的聚合物 SPAAP (4)和侧链为苯基的聚合物 SPAAP (5)的玻璃化转变温度显著较高，说明刚性的苯环和高度支化的叔丁基具有较强的空间位阻效应，阻碍了分子的链段运动。从空间位阻效应分析，对比侧链为三甲基的聚合物 SPAAP (1)与侧链为三乙基的聚合物 SPAAP (2)，短链烷基的适度延长可通过增强范德华力提升玻璃化转变温度，而柔性链过长会降低材料刚性。研究结果表明，设计侧链空间构型与刚性特征可有效调控材料玻璃化转变温度，且聚合物 SPAAP (1)~(5)相比于常见的聚甲基丙烯酸甲酯类聚合物[22]表现出更好的耐热性能。

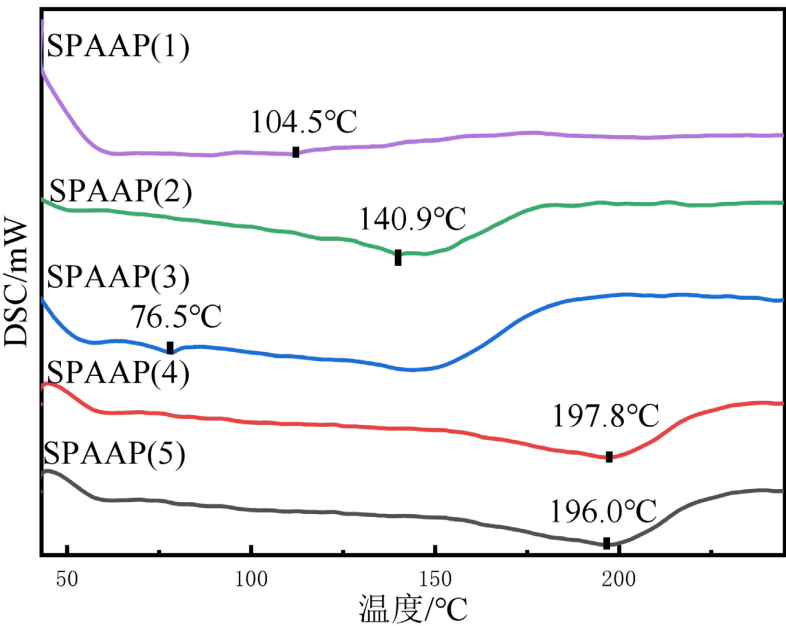


Figure 7. Glass transition temperature of polymer SPAAP
图 7. 聚合物 SPAAP 的玻璃化转变温度

3.6. 聚合物 SPAAP 的可见光透过率

图 8 所示为聚合物的可见光透过率测试，由图 8 可知，聚合物 SPAAP (2)具有最高的可见光透过率。

尽管聚合物 SPAAP (2)具有超过 90%的交联度，仍能实现大于 92%的可见光透过率(450 nm~550 nm)。这是因为其侧链的大体积柔性基团的存在可以优化材料的光学性能，使分子链段排列较为松散，又因为其分子链上极性基团较少，较少吸收可见光，呈现了极高的可见光透过率。聚合物 SPAAP (3)的交联度为 99%，高交联度导致分子间产生应力并发白，极大影响聚合物的可见光透过率(68%)。

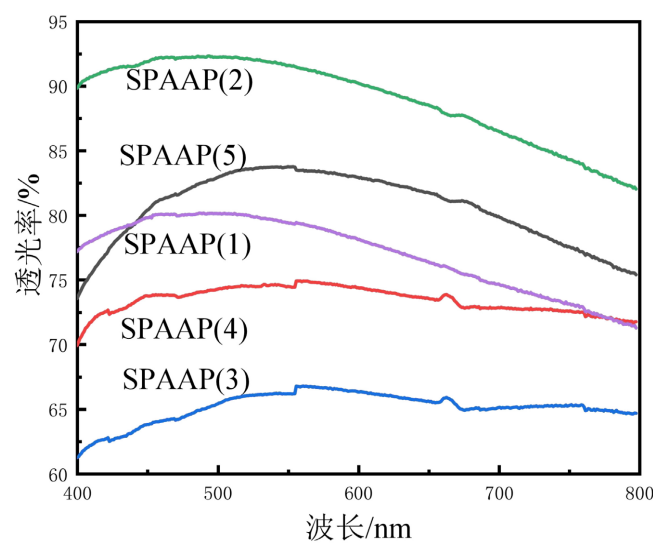


Figure 8. Ultraviolet-visible spectrum of polymer SPAAP
图 8. 聚合物 SPAAP 的紫外可见光谱

3.7. 聚合物 SPAAP 的其他性能

表 2 为聚合物 SPAAP (1)~(5)的铅笔硬度、附着力、耐水性、耐酸碱性的测试，由表 2 可知，当聚合物分子中的侧链基团不同，其性能存在较大差异。聚合物 SPAAP (1)因为较短侧链基团三甲基的存在，使得分子间排列更加紧密，形成了规则的三维网络结构，呈现出较高的硬度(1H)和耐酸性。当侧链为高度支化的叔丁基时，聚合物 SPAAP (4)表现出了较好的耐酸碱性能，这是由于叔丁基的对称结构使得它的空间排列更加整齐和紧密，从而获得了更高的稳定性。。而聚合物 SPAAP (2)和 SPAAP (5)由于相对较低的交联度，分子结构的排列相对而言较松散，从而呈现了较低的耐酸碱性能，但是也因此都表现出了最高的附着力(-2)。

Table 2. Pencil hardness, adhesion, water resistance, acid and alkali resistance of SPAAP
表 2. SPAAP 的铅笔硬度、附着力、耐水性、耐酸碱性能

性能 聚合物	铅笔硬度	附着力	耐水性 ^a	耐酸性 ^b	耐碱性 ^c
SPAAP (1)	1H	0	溶胀发白	无变化	分散
SPAAP (2)	6B	-2	溶胀发白	分散	分散
SPAAP (3)	6B	-2	溶胀发白	分散	溶胀发白
SPAAP (4)	6B	1	溶胀发白	无变化	无变化
SPAAP (5)	6B	-2	溶胀发白	分散	分散

注：^a5 mL 蒸馏水常温避光存放，时间 48 h；^b5 mL 10%盐酸溶液常温避光存放，时间 48 h；^c5 mL 氢氧化钠溶液常温避光存放，时间 48 h。

4. 结论

在低温条件下合成了 *N*-(3-羟丙基)丙烯酰胺(HPAA), 与不同结构的氯硅烷合成了五种不同结构的丙烯酰胺型有机硅预聚体 SPAA (1)~(5), 使用光引发剂 TPO 通过紫外光固化得到了相应的聚合物 SPAAP (1)~(5)。聚合物 SPAAP (1)~(5)的交联度均较高(97%~99%), 在玻璃化转变温度、附着力、硬度、耐水性、耐酸碱性以及可见光透过率等性能方面均表现良好。不同结构的预聚体在分子体积、空间排列上的差异会导致得到的聚合物在物理化学等性能方面有所不同。比如: 聚合物 SPAAP (1)则展现出最高的硬度(1H), SPAAP (2)的可见光透过率最高(92%), SPAAP (4)具有最好的耐酸碱性能, SPAAP (5)的玻璃化转变温度最高(212.01℃)。

基金项目

新疆师范大学大学生创新创业训练计划项目(x202310762127); 特种工业润滑材料研发及推广应用(新疆天山人才计划, 项目编号: 601001000101)。

参考文献

- [1] Huang, S., Huang, H., Liu, X. and Xiang, H. (2024) Free-Radical/Cationic Hybrid UV-Curable Silicone Resin for Age-Resistant Coatings. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **63**, 14657-14667. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01943>
- [2] Zhang, W., Wang, R., Yang, Z., Bai, Y., Meng, L. and Wang, Y. (2023) Synthesis of UV Rapid Curing Silicone Coatings via Photoinitiated Thiol-Ene Click Polymerization for Pressure-Sensitive Adhesive. *Polymer*, **283**, Article ID: 126222. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126222>
- [3] Liu, F., Liu, A., Tao, W. and Yang, Y. (2020) Preparation of UV Curable Organic/inorganic Hybrid Coatings—A Review. *Progress in Organic Coatings*, **145**, Article ID: 105685. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105685>
- [4] Wang, Q., Thomas, J. and Soucek, M.D. (2023) Investigation of UV-Curable Alkyd Coating Properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, **20**, 545-557. <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00697-9>
- [5] Deng, J., Kong, R., Liu, Z., Weng, Y. and Fan, L. (2023) Preparation of Fluorescent UV-Curable Adhesives Containing Aiegen-Modified Monomer. *Dyes and Pigments*, **220**, Article ID: 111761. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111761>
- [6] Wan, Z., Zhang, H., Niu, M., Zhang, W., Guo, Y. and Li, H. (2024) Development of Lignin-Derived UV-Curable Resin for DLP 3D Printing. *Industrial Crops and Products*, **221**, Article ID: 119243. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119243>
- [7] Liu, W., Tian, P., Huang, Y. and Zhang, J. (2022) A Novel UV-Curable Epoxy Resin Modified with Cholic Acid for High-Frequency Dielectric Packaging. *Progress in Organic Coatings*, **167**, Article ID: 106849. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106849>
- [8] 李大强. 聚丙烯酰胺的应用进展[J]. 广东化工, 2022, 49(17): 90-91, 86.
- [9] Lin, C., Zhang, J., Wang, L., Zheng, J., Xu, F., Zhou, J., et al. (2013) Study on Fouling-Resistant Performance Improvement of Silicone-Based Coating with Poly(Acrylamide-Silicone). *International Journal of Electrochemical Science*, **8**, 6478-6492. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)14778-x](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)14778-x)
- [10] Zhang, Z., Zhao, X., Su, Y., Xing, D. and Han, X. (2017) Fabrication of Vinyl Organosilicon @poly-N, N'-[(4, 5-Dihydroxy-1, 2-Phenylene)bis(Methylene)]Bisacrylamide) Core@Shell Antibacterial Agent. *Materials Science and Engineering: C*, **77**, 624-629. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.001>
- [11] Joo, J. and Jang, J. (2018) Acrylamide-Assisted Photografting of Bisacrylamide Dyes onto Cotton. *Fibers and Polymers*, **19**, 782-789. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7718-x>
- [12] Rodrigues, S.B., Petzhhold, C.L., Gamba, D., Leitune, V.C.B. and Collares, F.M. (2018) Acrylamides and Methacrylamides as Alternative Monomers for Dental Adhesives. *Dental Materials*, **34**, 1634-1644. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.08.296>
- [13] 杨德桢, 孙传强, 韩哲, 等. 分子间相互作用调控丝素蛋白/聚丙烯酰胺水凝胶的网络形貌和 β 片结晶, 赋予水凝胶优异的黏附、应变和传感性能[J]. 中国科学: 材料科学(英文版), 2024, 67(5): 1533-1542.
- [14] 何文峰, 赵彤杰, 谢于, 等. 耐高温含氢乙基有机硅树脂的合成及改性[J]. 中国塑料, 2025, 39(1): 31-36.
- [15] Rustoy, E.M. and Baldessari, A. (2006) Chemoselective Enzymatic Preparation of N-Hydroxyalkylacrylamides, Monomers

- for Hydrophilic Polymer Matrices. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, **39**, 50-54.
<https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2006.01.026>
- [16] 李晶, 曹碧辉, 李施扬, 等. GB/T 1728-2020 漆膜、腻子膜干燥时间测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [17] 肖桃云, 杨小武, 杨斌, 等. GB/T 36965-2018 光伏组件用乙烯-醋酸乙烯共聚物交联度测试方法 差示扫描量热法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [18] 陈刚, 何汶华, 徐芸莉, 等. GB/T 9286-2021 色漆和清漆 漆膜的划格试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [19] 陈刚, 王崇武, 彭菊芳, 等. GB/T 6739-2022 色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [20] 西北油漆厂. GB/T 1733-1993 漆膜耐水性测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [21] 西北油漆总厂. GB/T 9274-1988 色漆和清漆 耐液体介质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [22] Pan, Y., Yang, B., Jia, N., Yu, Y., Xu, X., Wang, Y., *et al.* (2021) Enhanced Thermally Conductive and Thermomechanical Properties of Polymethyl Methacrylate (PMMA)/Graphene Nanoplatelets (GNPs) Nanocomposites for Radiator of Electronic Components. *Polymer Testing*, **101**, Article ID: 107237.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107237>