

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.006

PAM/IA-g-XG水凝胶的制备及性能

侯露^{1,2}, 徐玉平^{1,2}, 杨小妹¹, 张磊^{1,2}

(1. 凯里学院大健康学院, 贵州凯里 556011; 2. 贵州省普通高等学校黔东南苗侗药现代化研究重点实验室, 贵州凯里 556011)

摘要: 为开发面向生物医学、农业或食品工业领域的天然多糖基功能材料,以黄原胶(XG)为主链,丙烯酰胺(AM)和衣康酸(IA)为功能性单体,硝酸铈铵(CAN)为引发剂,通过自由基接枝共聚反应制备不同AM、IA质量比 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 的PAM/IA-g-XG水凝胶,通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X射线衍射(XRD)、热重(TG)分析和接触角测试对其进行表征,并考察单体对接枝率、溶胀性能、保水性能、生物降解性能的影响。结果表明,随着IA比例的增加,PAM/IA-g-XG水凝胶的接枝率呈现先升高后下降的趋势,并在 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:4$ 时达到最高,为105.98%。FTIR结果显示酰胺基和羧基的相关特征吸收峰;XRD结果显示PAM/IA-g-XG水凝胶呈现更明显的无定形特征;TG和接触角的分析进一步说明AM和IA的引入改变了XG的热稳定性和表面润湿性,由此证明AM和IA已成功接枝于XG主链上。性能测试结果显示, $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:2$ 时水凝胶溶胀率最高,达到415%,并表现出一定的保水性能;21 d后各组样品降解率均达到30%以上,其中 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:5$ 时PAM/IA-g-XG水凝胶降解率最高。通过AM和IA对XG进行接枝改性,获得吸水性能佳、降解性良好的多糖基功能材料,为应用于生物医学、农业或食品工业领域提供参考。

关键词: 黄原胶; 丙烯酰胺; 衣康酸; 水凝胶; 接枝共聚

中图分类号: TQ31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0057-06

Preparation and Performance of PAM/IA-g-XG Hydrogels

HOU Lu^{1,2}, XU Yuping^{1,2}, YANG Xiaomei¹, ZHANG Lei^{1,2}

(1. School of Life and Health Science, Kaili University, Kaili 556011, China;

2. Key Laboratory for Modernization of Qiangdongnan Miao & Dong Medicine of Higher Education Institutions in Guizhou Province, Kaili 556011, China)

Abstract: To develop natural polysaccharide-based functional materials for biomedical, agricultural and food industrial applications, with xanthan gum (XG) as the main chain, acrylamide (AM) and itaconic acid (IA) as functional monomers, and cerium nitrate ammonium (CAN) as the initiator. PAM/IA-g-XG hydrogels with different mass ratios of AM and IA, $m(\text{AM}):m(\text{IA})$, were prepared through free-radical graft copolymerization. The hydrogels were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TG) analysis, and water contact angle measurements to investigate the effects of monomer ratio on grafting rate, swelling, water-retention performance, and biodegradability. The results show that the grafting rate of PAM/IA-g-XG first increased and then decreased with increasing IA content. The maximum grafting rate of 105.98% is obtained at $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ of 2:4. FTIR analysis shows characteristic absorption bands related to amide and carboxyl groups. XRD results indicate that the PAM/IA-g-XG hydrogel exhibits a more pronounced amorphous structure. TG and contact angle analyses further demonstrate that the introductions of AM and IA have changed the thermal stability and surface wettability of XG, confirming the successful grafting of AM and IA onto the XG backbone. The performance tests show that the hydrogel prepared at $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ of 2:2 exhibits the highest swelling ratio of 415% and shows good water-retention capacity. After 21 days, the degradation ratios of all samples exceed 30%, with the highest degradation ratio observed for the hydrogel prepared at $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ of 2:5. Graft modification of XG with AM and IA produces polysaccharide-based functional materials with favorable water absorp-

基金项目: 凯里学院校级青年课题项目(2025YB035),凯里学院学科专业平台团队一体化建设规划团队项目(YTH-TD20254I),贵州省2023年省级金课项目(SJK202346)

通信作者: 张磊, 博士, 教授, 研究方向为药物分子绿色合成

收稿日期: 2026-07-07

引用格式: 侯露, 徐玉平, 杨小妹, 等. PAM/IA-g-XG水凝胶的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9):57-62.

HOU Lu, XU Yuping, YANG Xiaomei, et al. Preparation and Performance of PAM/IA-g-XG Hydrogels[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9):57-62.

tion and degradability, providing a reference for their potential applications in biomedical, agricultural, and food industrial fields.

Keywords: xanthan gum; acrylamide; itaconic acid; hydrogel; graft copolymerization

生物材料是指具有良好的生物相容性的材料,常应用于伤口敷料和药物递送等医学领域^[1-2]、重金属吸附等农业领域^[3]、食品保鲜和益生菌包封^[4]等食品领域。水凝胶作为生物材料中的重要类型,具有亲水性好,网络结构可控,以及良好的生物相容性等特点,广泛受到关注。天然多糖高分子因具有优异的生物相容性和生物降解性,且结构中含有丰富的羟基、羧基和氨基等活性基团可为化学改性提供条件^[2,5-7],是制备水凝胶的重要原料,常见的多糖类有海藻酸钠、壳聚糖、果胶和黄原胶(XG)等。通过接枝改性、交联等方式,可在保留天然多糖基本骨架的基础上改善其溶胀性能、机械稳定性能、热稳定性能和环境响应性能等^[8]。因此,以天然多糖为基体制备功能性水凝胶,是开发绿色可降解高分子材料的重要方向。

XG是一种阴离子型胞外多糖,具有良好的增稠性、亲水性和生物相容性,在酸性和碱性环境中均能保持稳定,且含有丰富的羧基和羟基^[9]。通过对XG化学改性,可以增强其热稳定性、溶胀能力和机械稳定性等^[10],使其在生物医学和食品工业等领域得到广泛的应用^[11-12]。接枝共聚是天然多糖化学改性中常用的方法之一,通过引发剂在多糖主链上的羟基产生活性位点,使具有碳碳双键的单体在多糖骨架上发生自由基聚合,从而形成天然高分子与合成聚合物的接枝结构^[13]。目前已有研究将XG与不同单体接枝共聚,如Kumar等^[14]将XG与丙烯酰胺(AM)接枝共聚,考察了药物的体外释放性能,Zheng等^[3]将XG与AM/丙烯酸接枝共聚,考察了重金属离子的吸附性能。

AM含有亲水性酰胺基,衣康酸(IA)含有双羧基和碳碳双键。AM/IA二元单体已用于其他天然多糖的接枝改性,如Lanthong等^[15]通过将不同配比的AM/IA二元单体接枝于木薯淀粉,表明不同配比对材料的吸水性能具有明显影响;Moussa等^[16]通过将不同配比的AM/IA接枝于透明质酸,同样表明不同配比对材料的结构与性能具有明显影响。上述研究表明,AM/IA配比是影响天然多糖接枝体系结构和性能的重要因素。

基于此,本研究以XG为基体,以硝酸铈铵(CAN)为引发剂,将AM与IA通过自由基聚合法制备PAM/IA-g-XG水凝胶。通过调整AM与IA的单体质量配比,探究其对接枝率以及水凝胶性能(溶胀

性能、保水性能及降解性能)的影响,并采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X射线衍射(XRD)、热重(TG)分析和接触角测试对PAM/IA-g-XG水凝胶的结构与性质进行表征,为以XG为基体的水凝胶在生物医学、农业或食品工业领域的应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

XG: USP级,上海麦克林生化科技有限公司;
AM: 分析纯,上海阿拉丁试剂有限公司;
IA: 分析纯,上海迈瑞尔化学技术有限公司;
CAN: 分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;
无水乙醇、乙二醇: 分析纯,成都金山化学试剂有限公司。

1.2 主要设备及仪器

FTIR 仪: Nicolet iS20, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司;
XRD 仪: Ultima IV, 日本 Rigaku 公司;
同步热分析(TG-DSC)仪: STA449F3, 德国 Netzsch 公司;

接触角测量仪: JY-82C, 承德鼎盛试验机检测设备有限公司。

1.3 PAM/IA-g-XG 水凝胶的制备

称取 1.0 g 的 XG 加入 150 mL 的蒸馏水中,磁力搅拌下使其充分溶解,加入 10 mmol/L CAN 引发剂,在 120 °C 条件下反应 1 h,随后分别滴加五组 AM 与 IA 单体质量配比 $[m(\text{AM}):m(\text{IA})]$ 为 2:1、2:2、2:3、2:4、2:5 的混合溶液,反应 2 h。自然冷却,倒入 500 mL 乙醇,抽滤以除去杂质,将所得粗产物用乙二醇洗涤后,进一步用乙醇反复洗涤,80 °C 烘干至恒重得提纯后的产物,即为 PAM/IA-g-XG 水凝胶。根据式(1)计算接枝率。

$$G = \frac{m_{\text{gc}} - m_{\text{xg}}}{m_{\text{xg}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: G 为接枝率, m_{gc} 为 PAM/IA-g-XG 水凝胶的质量,单位 g; m_{xg} 为 XG 的质量,单位 g。

1.4 测试与表征

1.4.1 FTIR 表征

通过 KBr 压片制备 XG 和 PAM/IA-g-XG 水凝胶测试样品,采用普通模式和 ATR 透射模式进行分析,波长范围为 500~4 000 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描次数为 32 次。

1.4.2 XRD 分析

取适量 XG 和 PAM/IA-g-XG 水凝胶测试样品进行 XRD 结构表征,采用 Cu 靶辐射,电流为 40 mA,电压为 40 kV,扫描范围(2θ)为 $10^\circ\sim 80^\circ$

1.4.3 TG-DSC 分析

取适量 XG 和 PAM/IA-g-XG 水凝胶测试样品置于 Al_2O_3 坩埚中,在 N_2 气氛保护下展开,气体流速为 50 mL/min,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,测试温度范围为 $30\sim 500^\circ\text{C}$ 。

1.4.4 接触角测量

将去离子水滴加至 XG 和 PAM/IA-g-XG 水凝胶样品表面,采用水座滴法进行测量,利用高分辨率相机捕捉液滴形态影像,通过量高法计算静态接触角数值。

1.4.5 溶胀性能

准确称取五组不同 AM 与 IA 配比且均已干燥至恒重的 PAM/IA-g-XG 水凝胶样品,记为 m_0 。随后,将各组样品浸泡于室温下的蒸馏水中以使其充分吸水。直至水凝胶达到溶胀平衡后取出,迅速利用滤纸吸干其表层残留的水分,并再次称重,记为 m_e ,根据式(2)计算溶胀率(S_w)^[17]。

$$S_w = \frac{m_e - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

1.4.6 保水性能

准确称取五组不同 AM 与 IA 配比且均已干燥至恒重的 PAM/IA-g-XG 水凝胶样品,记为 m_0 。待溶胀平衡后称重,记为 m_e 。随后转移至 37°C 烘箱内,每隔 30 min 取出各组水凝胶称重,直至质量维持恒定,记为 m_i 。根据式(3)计算保水率(W_R)^[18]。

$$W_R = \frac{m_i - m_0}{m_e - m_0} \times 100\% \quad (3)$$

1.4.7 降解性能

准确称取五组不同 AM 与 IA 配比且均已干燥至恒重的 PAM/IA-g-XG 水凝胶样品,记为 m_0 ,浸泡于蒸馏水中进行生物降解实验,分别于第 1 天、第 7 天、第 14 天及第 21 天取出相应的水凝胶样品,置于 50°C 烘箱中重新烘干至质量恒定,称重记为 m_d ,根据式(4)计算降解率(D)^[19]。

$$D = \frac{m_0 - m_d}{m_0} \times 100\% \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 PAM/IA-g-XG 水凝胶的接枝共聚

PAM/IA-g-XG 水凝胶是通过 CAN 引发的自由基接枝共聚反应制备而成,CAN 中的 Ce(IV)可与

XG 主链上的羟基形成络合物,将自身还原为 Ce(III),同时在 XG 主链上产生自由基活性位点。XG 主链上的自由基进攻 AM 和 IA 上的 C=C 双键,引发单体在 XG 主链上发生接枝共聚反应,形成 PAM/IA-g-XG 水凝胶。图 1 为 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 对接枝共聚反应的影响。随着 IA 含量的增加,PAM/IA-g-XG 水凝胶的接枝率呈现先升高后下降的趋势。当 IA 比例含量较低时,体系中可参与接枝共聚的单体数量有限,接枝共聚反应不充分,此时接枝率较低。随着 IA 比例的升高,IA 分子中的 C=C 双键充分参与接枝共聚反应,使接枝率不断升高,在 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:4$ 时达到最高值。继续增加 IA 的比例至 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:5$ 时,接枝率下降。这可能是因为随着 IA 比例的进一步升高,部分 AM 和 IA 未与 XG 主链接枝共聚,而是在反应体系中发生均聚或共聚,形成未接枝的聚合产物,导致接枝率下降^[15,20]。

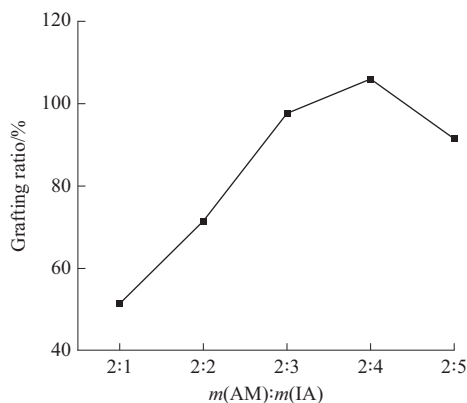


图1 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 对接枝共聚反应的影响

Fig 1 Effect of $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ on the graft copolymerization reaction

2.2 FTIR 分析

图2为 XG、IA、AM 及 PAM/IA-g-XG 的 FTIR 光谱图,由图2可知,对于 XG 主要有三个特征吸收峰,在 3430 cm^{-1} 附近出现的宽吸收峰为 XG 中—OH 的伸缩振动峰, 2927 cm^{-1} 附近为—CH 的伸缩振动峰, 1064 cm^{-1} 附近为多糖骨架中—C—O—C—伸缩振动峰。对于 IA 主要有四个特征吸收峰,在 1703 cm^{-1} 附近为羧基团中的—C=O 伸缩振动峰, 1630 cm^{-1} 附近为 C=C 双键的伸缩振动峰, 987 cm^{-1} 附近和 913 cm^{-1} 附近为=C—H 的面外弯曲振动峰。对于 AM 主要有三个特征吸收峰, 3190 cm^{-1} 附近为—NH 的伸缩振动峰, 1678 cm^{-1} 附近为酰胺 I 带峰, 1603 cm^{-1} 附近为酰胺 II 带峰。对于 PAM/IA-g-XG 水凝胶,在保留 XG 主链特征峰的基础上,IA 中羧基 C=O 伸缩振动峰由 1703 cm^{-1} 移至 1710 cm^{-1} ,AM 中酰胺

I带峰由 $1\,678\text{ cm}^{-1}$ 移至 $1\,661\text{ cm}^{-1}$, 酰胺II带峰由 $1\,603\text{ cm}^{-1}$ 移至 $1\,551\text{ cm}^{-1}$ 。与单体相比,上述吸收峰所发生的改变可能与AM和IA参与聚合后—COOH和—CONH₂基团所处的局部化学环境发生变化有关。AM和IA链段引入后,—COOH、—CONH₂与XG主链—OH之间可能形成新的氢键等分子间作用。且IA中 987 cm^{-1} 和 913 cm^{-1} 附近的峰未出现,表明IA中的C=C在自由基聚合反应中被消耗。—COOH和—CONH₂基团相关吸收峰的出现和C=C双键相关吸收峰的消失,支持PAM/IA-g-XG接枝结构的形成。

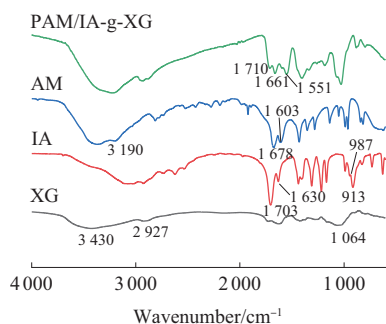


图2 XG、IA、AM及PAM/IA-g-XG的FTIR光谱图

Fig 2 FTIR spectra of XG, IA, AM, and PAM/IA-g-XG

2.3 XRD 分析

图3为XG与PAM/IA-g-XG的XRD谱图,由图3可知,XG在 $2\theta \approx 20^\circ$ 附近出现明显的宽衍射峰,表明XG分子链中存在一定程度的有序结构。与XG相比,PAM/IA-g-XG的衍射峰强度明显降低,在 $2\theta \approx 20^\circ$ 附近的宽峰显著减弱,且整体谱线趋于平缓,说明AM和IA的引入破坏了XG分子链间原有的氢键作用和链段的排列方式,PAM/IA-g-XG呈现出更强的无定形特征。XRD结果显示通过AM和IA对XG的接枝改性,改变了XG的结晶结构和链段堆积方式,表明AM和IA已接枝于XG主链。

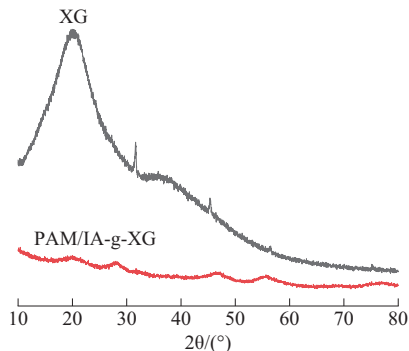


图3 XG与PAM/IA-g-XG的XRD谱图

Fig 3 XRD spectra of XG and PAM/IA-g-XG

2.4 TG 分析

图4为XG与PAM/IA-g-XG的TG曲线,由图4可知,在 $30 \sim 150^\circ\text{C}$ 阶段,TG曲线中XG与PAM/IA-g-XG水凝胶的质量损失均主要为样品中自由水和结合水的挥发。与XG相比,PAM/IA-g-XG水凝胶在升温初期失重略高于XG,这是因为PAM/IA-g-XG水凝胶所引入的酰胺基和羧基基团增加了其亲水性。在 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 阶段,XG出现快速失重,主要与XG主链的断裂有关;而PAM/IA-g-XG水凝胶失重较为缓慢,主要与XG主链与接枝链段的断裂有关。在 500°C 时,PAM/IA-g-XG水凝胶质量损失率明显低于XG。TG结果表明AM和IA的接枝改性提高了XG的热稳定性,表明AM和IA已接枝于XG主链。

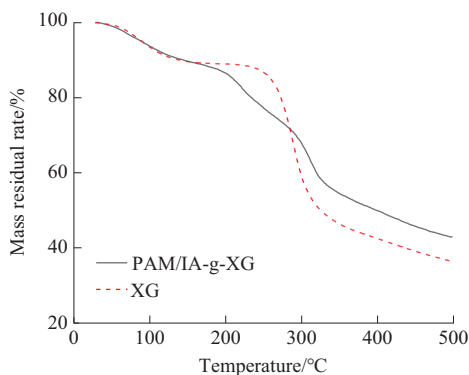


图4 XG与PAM/IA-g-XG的TG曲线

Fig 4 TG curves of XG and PAM/IA-g-XG

2.5 接触角分析

XG与PAM/IA-g-XG的接触角测试结果如图5所示,XG的接触角为 63.3° ,表明其具有较好的亲水性,这是因为XG含有大量的羟基、羧基等亲水基团,水滴在其表面得到较好的铺展。接枝共聚改性后,PAM/IA-g-XG水凝胶接触角为 78.9° ,明显大于XG的接触角。这是因为AM和IA链段的引入,改变了XG表面亲水基团的暴露程度及分子间氢键的作用,使水滴在表面的铺展受到一定的限制,但接触角仍小于 90° ,表明其仍具备亲水性。通过PAM/IA-g-XG水凝胶接触角与XG明显的不同,表明AM和IA已接枝于XG主链。

2.6 溶胀性能

图6为 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 对溶胀率的影响,由图6可知,随着IA比例的升高,PAM/IA-g-XG水凝胶的溶胀率呈现先升高后降低的趋势。当 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 由 $2:1$ 增加至 $2:2$ 时,接枝率升高,表明更多的AM和IA单

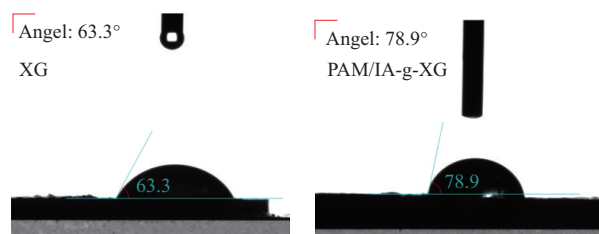
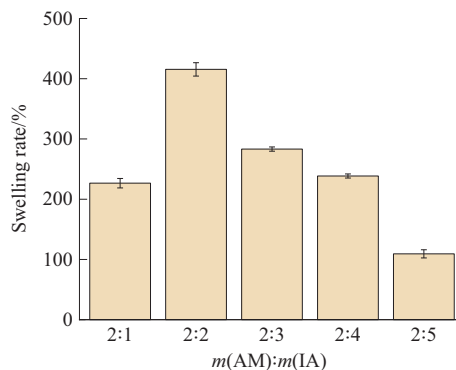


图5 XG与PAM/IA-g-XG的接触角图

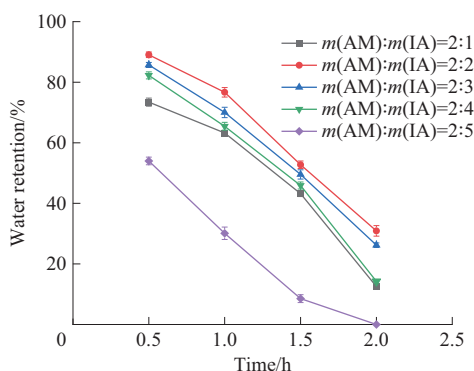
Fig 5 Water contact angle measurements of XG and PAM/IA-g-XG

体接枝共聚于XG主链上,使PAM/IA-g-XG水凝胶具有较多的酰胺基团和羧基基团,增强了PAM/IA-g-XG水凝胶与水分子的氢键作用,帮助水分子进入PAM/IA-g-XG水凝胶网络内部,因此当 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 为2:2时,PAM/IA-g-XG水凝胶表现出最高的溶胀性能。当继续提高IA的比例,虽接枝率呈现升高后下降的趋势,但整体接枝率均高于 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:2$ 的样品,此时溶胀率呈现下降趋势。这是因为过量的IA引入使体系中未电离的羧基含量增加,导致氢键作用和链间缠绕的影响增大,使PAM/IA-g-XG水凝胶网络结构趋于致密,限制了其溶胀性能^[21]。

图6 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 对溶胀率的影响Fig 6 Effect of $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ on swelling ratio

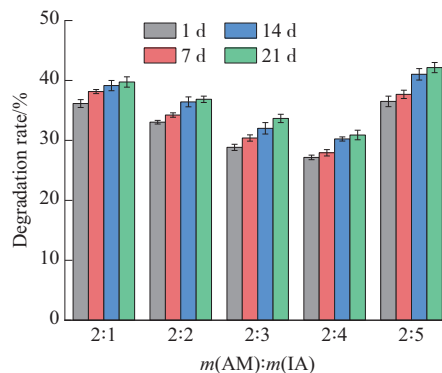
2.7 保水性能

图7为 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 对保水率的影响,由图7可知,随着保水时间的延长,五组PAM/IA-g-XG水凝胶的保水率均逐渐下降,当保水时间为1 h时,除 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:5$ 的PAM/IA-g-XG水凝胶外,其余四批水凝胶保水率均高于60%,其中 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:2$ 的PAM/IA-g-XG水凝胶始终具有最高的保水率,这与PAM/IA-g-XG水凝胶溶胀性能结果一致。这是因为适当的IA引入可以增强PAM/IA-g-XG水凝胶对水分的吸附与保持能力,当继续增加IA的比例时,过量的IA引入可能使PAM/IA-g-XG水凝胶结构致密,不利于水分的吸收与保持。

图7 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 对保水率的影响Fig 7 Effect of $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ on water retention

2.8 降解性能

图8为 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 对降解率的影响,由图8可知,随着降解时间的延长,不同比例的PAM/IA-g-XG水凝胶均出现降解率逐渐升高的现象,不同比例的PAM/IA-g-XG水凝胶之间降解率差异不大,当降解时间为21 d时,五组降解率在30%~40%之间,其中 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:5$ 时,降解率最高。当 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 在(2:1)~(2:4)之间,接枝率逐渐升高,呈现出降解率逐渐下降趋势;当 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:5$ 时,接枝率下降,降解率升高。降解率的趋势与接枝率呈现相反的趋势,这是因为XG主链赋予材料一定的生物可降解性,而不同的AM与IA的比例进一步影响PAM/IA-g-XG水凝胶的亲水性和网络结构稳定性。因此当 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 比例在(2:1)~(2:4)之间,较多的接枝共聚链段使PAM/IA-g-XG水凝胶网络结构更加稳定;当再增大AM与IA的比例时,过量的IA不利于形成稳定的网络结构。

图8 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ 对降解率的影响Fig 8 Effect of $m(\text{AM}):m(\text{IA})$ on degradation

3 结论

(1)以CAN为引发剂,通过自由基接枝共聚法制备了PAM/IA-g-XG水凝胶。随着IA比例升高,接枝率呈先升高后下降的趋势,并在 $m(\text{AM}):m(\text{IA})$

=2:4时达到最高,说明不同单体比例对接枝共聚反应有显著的影响。

(2)通过FT-IR、XRD、TG、接触角证明了AM和IA链段的引入,使XG的化学性质发生了改变,为AM和IA成功接枝于XG主链上提供了依据。

(3)不同AM、IA配比的PAM/IA-g-XG水凝胶性能存在差异,当 $m(\text{AM}):m(\text{IA})=2:2$ 时,PAM/IA-g-XG水凝胶具有最优的吸水和保水性能,可为其在生物医学、农业和食品工业等领域的进一步应用研究提供实验基础。

参考文献

- [1] SETHI S, Saruchi, KAITH B S, et al. Cross-linked xanthan gum-starch hydrogels as promising materials for controlled drug delivery[J]. *Cellulose*, 2020, 27(8):4 565–4 589.
- [2] LIU M F, JIN J M, ZHONG X Q, et al. Polysaccharide hydrogels for skin wound healing[J]. *Heliyon*, 2024, 10(15). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35014.
- [3] ZHENG M X, LIAN F L, ZHU Y J, et al. pH-responsive poly (xanthan gum-g-acrylamide-g-acrylic acid) hydrogel: Preparation, characterization, and application[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 210:38–46.
- [4] GAO R, ZHAO D D, ZHOU X X, et al. Advances in polysaccharide-based biopolymers for probiotic encapsulation: From single polysaccharides to composite systems[J]. *Current Research in Food Science*, 2025, 11. DOI: 10.1016/j.crf.2025.101186.
- [5] GANGULY K, CHATURVEDI K, MORE U A, et al. Polysaccharide-based micro/nanohydrogels for delivering macromolecular therapeutics[J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 193: 162–173.
- [6] YANG Q, PENG J R, XIAO H T, et al. Polysaccharide hydrogels: Functionalization, construction and served as scaffold for tissue engineering[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 278. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.118952.
- [7] NIE J Y, PEI B Y, WANG Z K, et al. Construction of ordered structure in polysaccharide hydrogel: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 205:225–235.
- [8] SINGH M, RAORANE C J, ALKA, et al. Recent progress on modified gum katira polysaccharides and their various potential applications[J]. *Polymers*, 2022, 14(17). DOI: 10.3390/polym14173648.
- [9] ARIMURA T, OMAGARI Y, YAMAMOTO K, et al. Chemoenzymatic synthesis and hydrogelation of amylose-grafted xanthan gums[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2011, 49(4):498–503.
- [10] BHAT I M, WANI S M, AHMAD MIR S, et al. Advances in xanthan gum production, modifications and its applications[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2022, 42. DOI: 10.1016/j.bcab.2022.102328.
- [11] BHARDWAJ B Y, VIHAL S, PAHWA R, et al. Recent advancements in xanthan gum-based gastroretentive floating formulations: Chemical modification, production and applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 348. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122809.
- [12] KUMAR P, KUMAR B, GIHAR S, et al. Review on emerging trends and challenges in the modification of xanthan gum for various applications[J]. *Carbohydrate Research*, 2024, 538. DOI: 10.1016/j.carres.2024.109070.
- [13] KAUR A, SUD D. Thionyl chloride facilitated polymerization of xanthan gum grafted copolymers for wastewater remediation by exclusion of synthetic dyes[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(12):4 978–4 998.
- [14] KUMAR A, SINGH K, AHUJA M. Xanthan-g-poly(acrylamide): Microwave-assisted synthesis, characterization and in vitro release behavior[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 76(2):261–267.
- [15] LANTHONG P, NUISIN R, KIATKAMJORNWONG S. Graft copolymerization, characterization, and degradation of cassava starch-g-acrylamide/itaconic acid superabsorbents[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 66(2):229–245.
- [16] MOUSSA A K, UNIVERSITY C, ABD EL-RAHMAN H A, et al. Multifunctional plasticized hyaluronic-acid-based nanogel dressing for accelerating diabetic and nondiabetic wounds[J]. *Biomacromolecules*, 2025, 26(6):3 495–3 513.
- [17] HE G H, TIAN S L, ZHOU Y Q, et al. Multifunctional modified chitosan hydrogel with excellent comprehensive properties by one pot[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2026, 366. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2026.152431.
- [18] 许雨琴, 杨建军, 吴庆云, 等. 壳聚糖-马来酸/丙烯酸胺双网络型超分子水凝胶制备及应用[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(10):124–132.
- XU Yuqin, YANG Jianjun, WU Qingyun, et al. Preparation and application of chitosan-maleic acid/acrylamide DoubleNetwork supramolecular hydrogel[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(10):124–132.
- [19] OMER A M, SADIK W A, EL-DEMERDASH A M, et al. Formulation of pH-sensitive aminated chitosan – gelatin crosslinked hydrogel for oral drug delivery[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2021, 25(12). DOI: 10.1016/j.jscs.2021.101384.
- [20] YANG L L, MA X Y, GUO N N, et al. Preparation and characteristics of sodium alginate/Na+rectorite-g-itaconic acid/acrylamide hydrogel films[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 105:351–358.
- [21] PULAT M, EKSİ H, ABBASOĞLU U. Fluconazole release from hydrogels including acrylamide-acrylic acid-itaconic acid, and their microbiological interactions[J]. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2008, 19(2):193–205.