

不同网络水凝胶在农业传感器上的力学性能研究

童俊杰¹, 于蓉蓉^{1*}, 乌伟¹, 乔昱荣¹, 李宇航², 武旭¹

¹西京学院计算机学院, 陕西 西安

²西京学院机械工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年6月16日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月24日

摘要

本文利用能量最小化原则, 使用不同分子量的PEO SN和PAA SN两种单网络水凝胶聚合成最优的PEO-PAA DN水凝胶结构模型, 对双网络水凝胶的力学性能进行研究。当PAA SN凝胶在压缩了30次之后, 其恢复效率值已经降低到30%。PAA/Agar和PAA/PVA双网络水凝胶在被压缩了30次之后分别下降到61%和55%。与SN水凝胶、DN水凝胶相比, TN水凝胶在被压缩30次之后仍然保持有90%以上的压缩恢复效率。值得注意的是, 30次循环压缩的测试表明, 在强压缩之后TN水凝胶没有发生明显的塑性变形和强度退化。即使在极高的压力下释放压力后还能快速地恢复原有的形状。它的恢复性能归功于化学和物理交联的三网络的可逆特性。特别是TN水凝胶中的PVA和Agar。

关键词

双网络水凝胶, 力学性能, 拉伸模拟

Research on Mechanical Properties of Different Network Hydrogels in Agricultural Sensors

Junjie Tong¹, Rongrong Yu^{1*}, Wei Wu¹, Yurong Qiao¹, Yuhang Li², Xu Wu¹

¹School of Computer Science, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²School of Mechanical Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 16th, 2025; accepted: Jul. 15th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 童俊杰, 于蓉蓉, 乌伟, 乔昱荣, 李宇航, 武旭. 不同网络水凝胶在农业传感器上的力学性能研究[J]. 农业科学, 2025, 15(7): 907-914. DOI: 10.12677/hjas.2025.157113

Abstract

This paper utilizes the principle of energy minimization to polymerize two single-network hydrogels, PEO SN and PAA SN, with different molecular weights into an optimal PEO-PAA DN hydrogel structural model, and investigates the mechanical properties of the double-network hydrogels. After 30 compressions, the recovery efficiency of the PAA SN gel drops to 30%. The recovery efficiencies of PAA/Agar and PAA/PVA double-network hydrogels decrease to 61% and 55%, respectively, after 30 compressions. Compared to SN and DN hydrogels, TN hydrogels maintain a compression recovery efficiency of over 90% after 30 compressions. Notably, the 30-cycle compression test indicates that TN hydrogels do not exhibit significant plastic deformation or strength degradation even after strong compression. They can quickly return to their original shape after being subjected to extremely high pressure. The recovery performance of TN hydrogels is attributed to the reversible characteristics of the chemically and physically crosslinked triple-network structure. Particularly, the PVA and Agar in TN hydrogels play a crucial role.

Keywords

Double-Network Hydrogels, Mechanical Properties, Tensile Simulation

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

中国作为一个农业大国，所以中国一直需要一种环境感应监控装置的传感器一种可以感应到被测物的信号变化的传感器以此来满足人们对环境信息的传输、处置、存储、显示、记录和控制等要求。如今农业市场倡导精准农业和智慧农业，其中精准农业是一种基于信息技术与农业生产全面结合的现代农业管理模式，其通过集成先进的技术，如全球卫星导航系统(GNSS)、传感器技术、机器视觉和数据分析等，实现对农业生产全过程的监测、调控和优化[1]。目前市场上农用墒情传感器的最佳选择是最好的，但这种传感器开关的触发，需要一种水凝胶材料驱动，其特点是能在自身结构中保留大量的水分。它们可用于传感器监测各种场景导致的形变，并表现出高可靠性[2]，这种独特的性质赋予了水凝胶优异的柔韧性和弹性，使其在多种应用场景中展现出卓越的性能[3]。三网络水凝胶则可以被制成各种各样的复杂形状，这对于水凝胶在传感器领域的应用是非常重要的，可以使其应用于各个领域，以适用不同仪器对水凝胶形状的要求。根据这些性质水凝胶就成了首选材料。近年来，出现了拓扑凝胶、纳米复合凝胶以及双网络凝胶等新型水凝胶，在提高水凝胶韧性方面取得了显著成果。

合成方法方面，传统方法多为化学法，即通过化学交联在分子链之间形成共价键使之结合。然而，此种方法所使用的化学交联剂以及溶剂等物质存在污染环境的潜在风险，有一定的毒性，且其内部的交联网络一旦断裂，绝大多数为永久损伤不可修复。另一种方法物理交联则由于其在形成时为非共价键(氢键、离子键、疏水缔合、主客体作用、 π - π 堆叠等)，具备一定的自愈能力，可在外部压缩或拉伸等反复破坏后再度结合[4]。

为了让水凝胶适用于农田传感器驱动材料，首先要考虑水凝胶的机械强度和农田环境中的自修复能力。传统的水凝胶机械强度低网络强度弱这些特性严重地限制了他的用途，为了解决上述问题，科学家

发明了许多新的水凝胶，如双网络水凝胶、纳米复合水凝胶、聚两性水凝胶、疏水缔合水凝胶。在新发明的水溶胶中 PAA 水凝胶的拉伸断裂强度和断裂伸长率分别为 69 k Pa 和 323%，低于 300 k Pa 和 560% 的 PAA/PVA 水凝胶，210 k Pa 和 470% 的 PAA/Agar 水凝胶，远低于 450 k Pa 和 497% 的 PAA/Agar/PVA 水凝胶。可以看出 PAA/Agar/PVA 水凝胶在所有上述凝胶中表现出了最高的拉伸强度，其拉伸断裂强度、断裂伸长率分别为 450 k Pa、497%，本研究根据对水凝胶的变压测试做出了实验。

2. 模型构建

PAA/Agar/PVA 三网络水凝胶的合成采用简单的聚合、冷却、冷冻/解冻三步法，制备流程如图 1 [5] 所示。

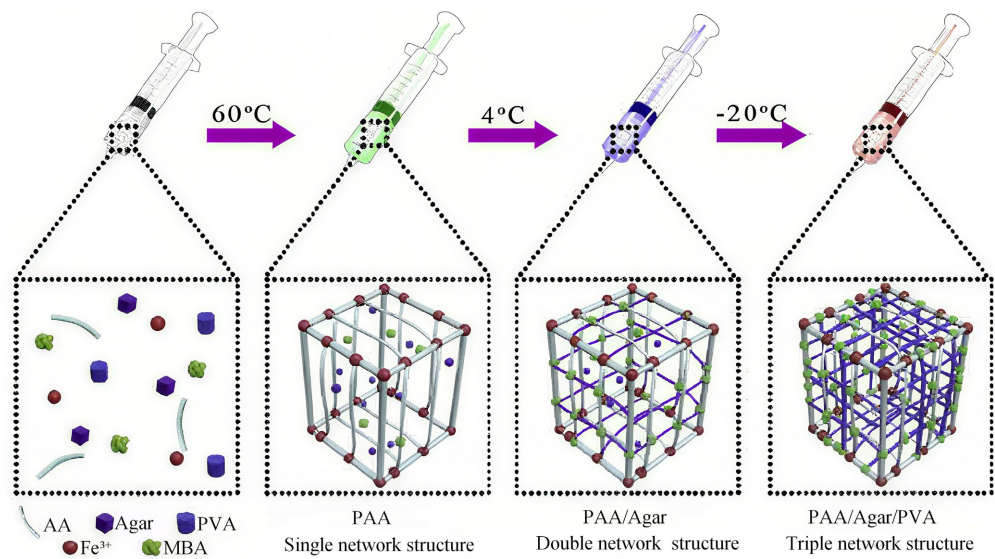


Figure 1. Flowchart for model construction of triple-network hydrogel [5]
图 1. 三网络水凝胶的模型构建流程图[5]

Table 1. Formulation table of components for various hydrogels [5]
表 1. 各种水凝胶的组分配方表[5]

Sample	Network	Agar (wt%)	PVA (wt%)	AA (g)	FeCl ₃ (wt%)	MBA (wt%)	APS (wt%)
PPA	SN	0.0	0	4	1.5	0.06	0.10
PAA/PVA	DN	0.0	5	4	1.5	0.06	0.10
PAA/Agar	DN	1.5	0	4	1.5	0.06	0.10
PAA/Agar/PVA	TN	1.5	5	4	1.5	0.06	0.10

首先将 Agar 和 PVA 在 95℃ 水浴锅中溶解在去离子水中。溶解完全后将混合溶液冷却到 50℃，然后将丙烯酸加入到混合物中。用氮气脱氧 10 min，继续加入引发剂过硫酸铵、交联剂 MBA 和 FeCl₃。将混合溶液搅拌均匀，之后灌入到圆柱形的玻璃模具中(直径 5 mm，长度 5 cm)，整个溶液体系在 60℃ 下维持 6 h，进行自由基聚合形成 PAA 第一层网络凝胶。然后，将混合物在 4℃ 下冷却 2 h 形成第二层琼脂凝胶网络，即 PAA/Agar 水凝胶。第三层 PVA 网络凝胶的形成是将上述样品放入-20℃ 的冰箱内下冷冻 2 h，使其结冰，再取出在室温下自然解冻 6 h，依次进行三次冷冻/解冻循环处理，便可得到第三层 PVA 凝胶，即 PAA/Agar/PVA 水凝胶。之后，从模具中取出凝胶样品。在合成的水凝胶体系中，PAA-Fe³⁺ 聚合物以

COO⁻和 Fe³⁺通过配位作用形成第一层网络, COO⁻和 Fe³⁺的可逆配位作用还能赋予水凝胶自修复性, 而 Agar 和 PVA 通过氢键作用形成第二层和第三层网络结构, 从而使水凝胶具有优异的力学性能[5]。为了进行对比试验, 采用相同的实验过程合成了不含琼脂或 PVA 的水凝胶。最终的样品按照网络结构及组分进行命名, 具体命名方式见表 1 [5]。

以下是对表格中四种样品配方及组分的文字描述: PPA 为单网络(SN)样品, 不含琼脂和 PVA, 以 PAA 为单一网络, 含 4 克 AA、1.5 wt% FeCl₃、0.06 wt% MBA、0.10 wt% APS; PAA/PVA 为双网络(DN)样品, 含 5 wt% PVA、0 wt%琼脂, 其余组分与 PPA 相同; PAA/Agar 为双网络(DN)样品, 含 1.5 wt%琼脂、0 wt% PVA, 其余组分与 PPA 一致; PAA/Agar/PVA 为三网络(TN)样品, 含 1.5 wt%琼脂和 5 wt% PVA, 其余组分与前三者相同。

3. 力学性质分析

力学性能作为柔性传感器的核心考察指标[6], 其重要性贯穿材料研发、结构设计到实际应用全流程。本研究将 PAA 水凝胶作为对照组, PAA/PVA 水凝胶, PAA/Agar 水凝胶, PAA/Agar/PVA 水凝胶作为实验组。如表 2, PAA 水凝胶的各项实验数据大多低于 PAA/PVA 水凝胶, PAA/Agar 水凝胶, PAA/Agar/PVA 水凝胶, 其中以 PAA/Agar/PVA 水凝胶数据为最优, 其拉伸断裂强度、断裂伸长率、弹性模量、 η_F 率和 η_K 率分别为 450 kPa、497%、125 kPa、72%和 84%。如图 2, 在不同类别的水凝胶中, 可以看出 PAA/Agar/PVA 水凝胶在所有上述凝胶中表现出了最高的力学性能。

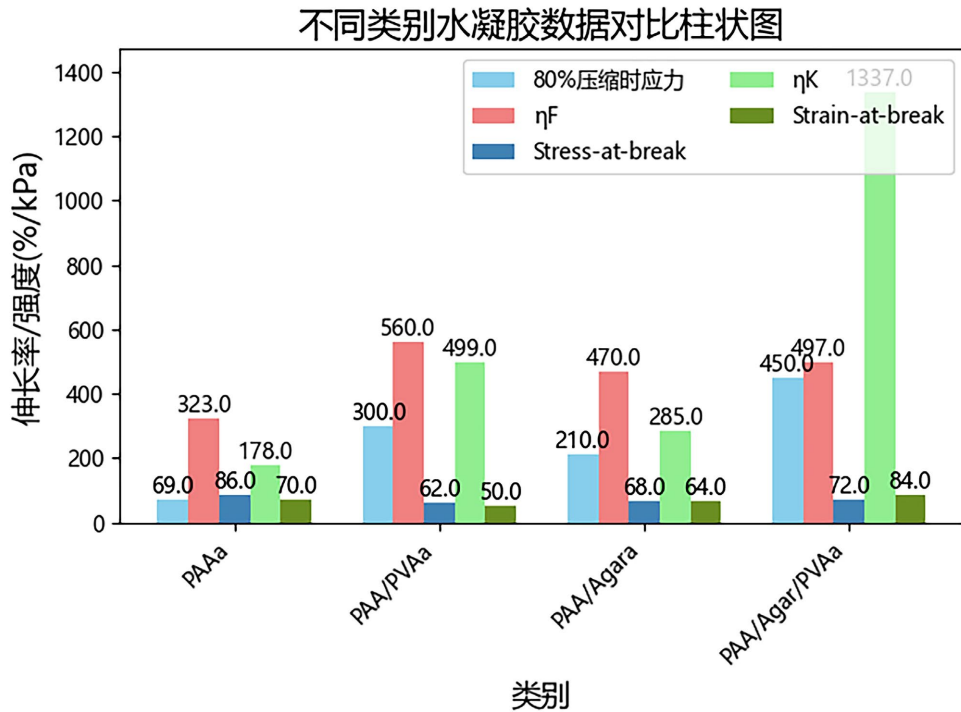


Figure 2. Bar chart for data comparison of different types of hydrogels
图 2. 不同类别水凝胶数据对比柱状图

在 PAA/Agar/PVA 水凝胶中, 含不同 FeCl₃ 浓度的水凝胶也有较大的差距, 其中 FeCl₃ 质量百分数为 0.5%的 PAA/Agar/PVA 水凝胶的拉伸断裂强度和断裂伸长率分别为 450 kPa 和 497%, 远优于其他 FeCl₃ 浓度的 PAA/Agar/PVA 水凝胶的拉伸断裂强度和断裂伸长率。

Table 2. Summary table of mechanical properties and recovery efficiency for samples with different compositions [5]
表 2. 不同成分的样品力学性能和恢复效率的总结归纳表[5]

Sample	Stress-at-break (kPa)	Strain-at-break (%)	Stress at 80% compression (kPa)	η_F (%)	η_K (%)
PAA ^a	69	323	178	86	70
PAA/PVA ^a	300	560	499	62	50
PAA/Agar ^a	210	470	285	68	64
PAA/Agar/PVA ^a	450	497	1337	72	84
PAA/Agar/PVA ^b	243	162	1410	49	39
PAA/Agar/PVA ^c	392	332	1392	63	42
PAA/Agar/PVA ^d	108	587	895	81	55
PAA/Agar/PVA ^e	30	876	236	93	63

注：*a 处 FeCl₃ 在凝胶中质量百分数为 1.5%，b~e 代表 FeCl₃ 在凝胶中质量百分数分别为 0.5%，1.0%，2.0%，2.5%。

本实验通过使用 Python 的 matplotlib，将原始数据(如来自 CSV 文件、数据库或 pandas 数据框)进行清洗与预处理，确保数据的准确性与完整性。根据表 2 中的数据分析目标选择合适的图表类型：用折线图追踪不同水凝胶的差距；以柱状图对比不同水凝胶的性能数据，高度差异清晰反映不同水凝胶的性能差异，来完成对数据的可视化处理。如图 3，含 FeCl₃ 在凝胶中质量百分数为 0.5% 的 PAA/Agar/PVA 水凝胶在表 2 中的水凝胶中表现出最稳定的拉伸断裂强度和断裂伸长率。

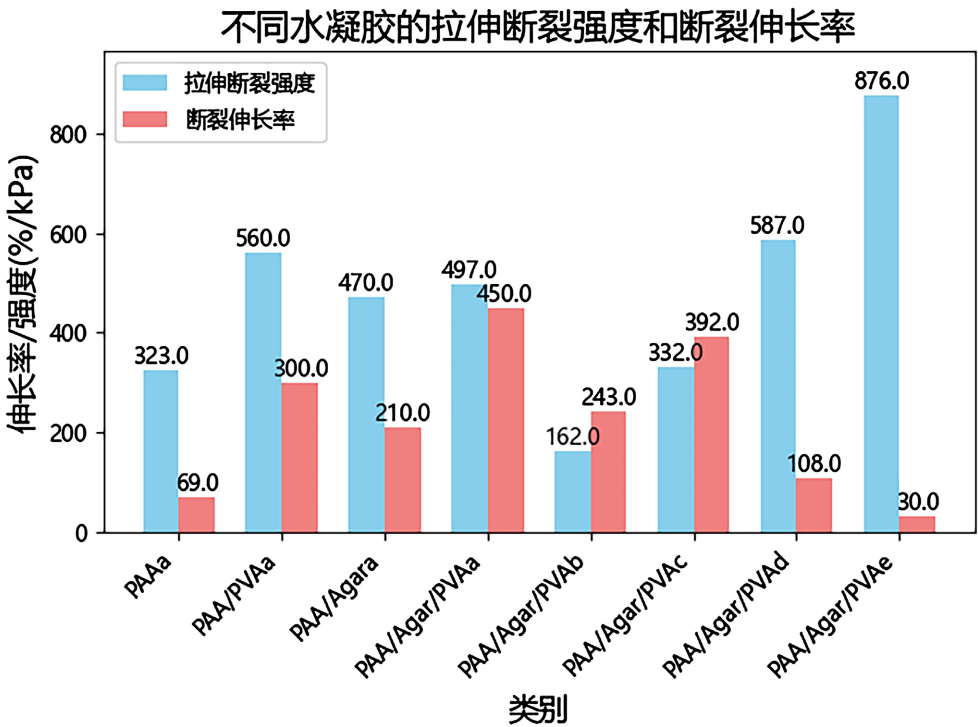


Figure 3. Bar chart of tensile fracture strength and elongation at break for different hydrogels
图 3. 不同水凝胶的拉伸断裂强度和断裂伸长率柱状图

如表 2，FeCl₃ 在凝胶中质量百分数为 0.5% 的 PAA/Agar/PVA 水凝胶在 80% 压缩时的应力为 1337

kPa, 仅低于 FeCl_3 在凝胶中质量百分数为 1.0% 的 PAA/Agar/PVA 水凝胶在 80% 压缩时的应力 1410 kPa 和 FeCl_3 在凝胶中质量百分数为 1.0% 的 PAA/Agar/PVA 水凝胶 80% 压缩时的应力 1392 kPa。 FeCl_3 在凝胶中质量百分数为 0.5% 的 PAA/Agar/PVA 水凝胶的 η_F 率处于中等偏上的水平。 FeCl_3 在凝胶中质量百分数为 0.5% 的 PAA/Agar/PVA 水凝胶的 η_K 率远高于其它水凝胶。通过上述数据分析以及图 4, 可以得出 FeCl_3 在凝胶中质量百分数为 0.5% 的 PAA/Agar/PVA 水凝胶在所有上述凝胶中最适合被使用于制作传感器, 最高的拉伸断裂强度和断裂伸长率体现了其优越的承载能力和适应性, 1337 kPa 的百分之八十压缩时的应力保证了其良好的抗压能力, 较高的 η_F 和 η_R 也表现了其自我恢复能力。

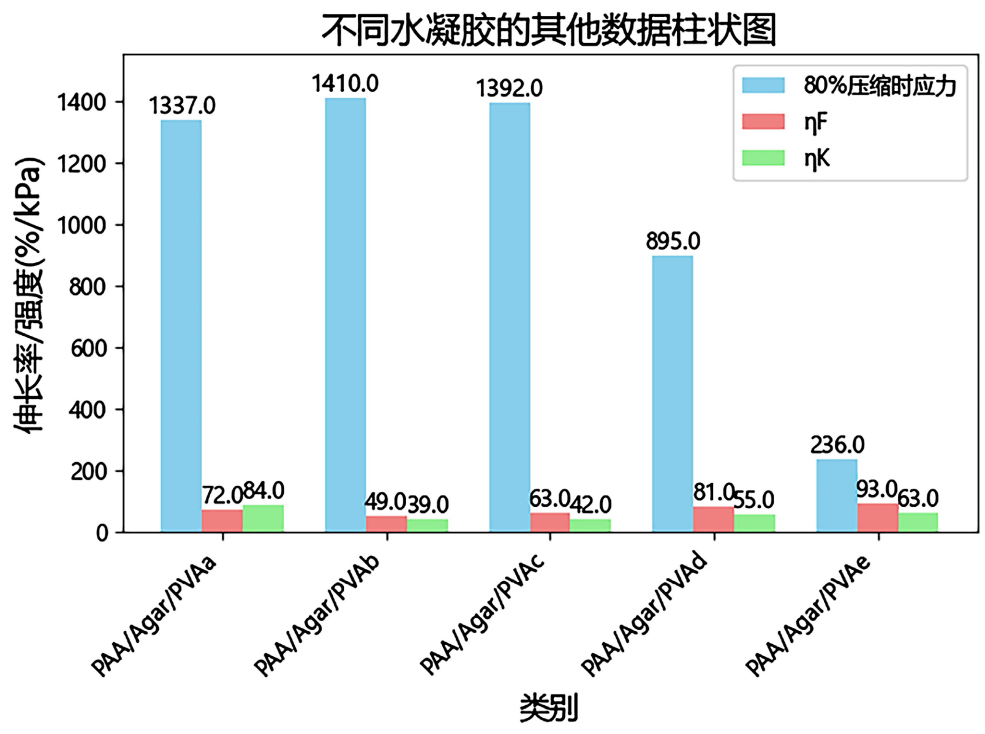


Figure 4. Bar chart of performance data for different hydrogels
图 4. 不同水凝胶的性能数据柱状图

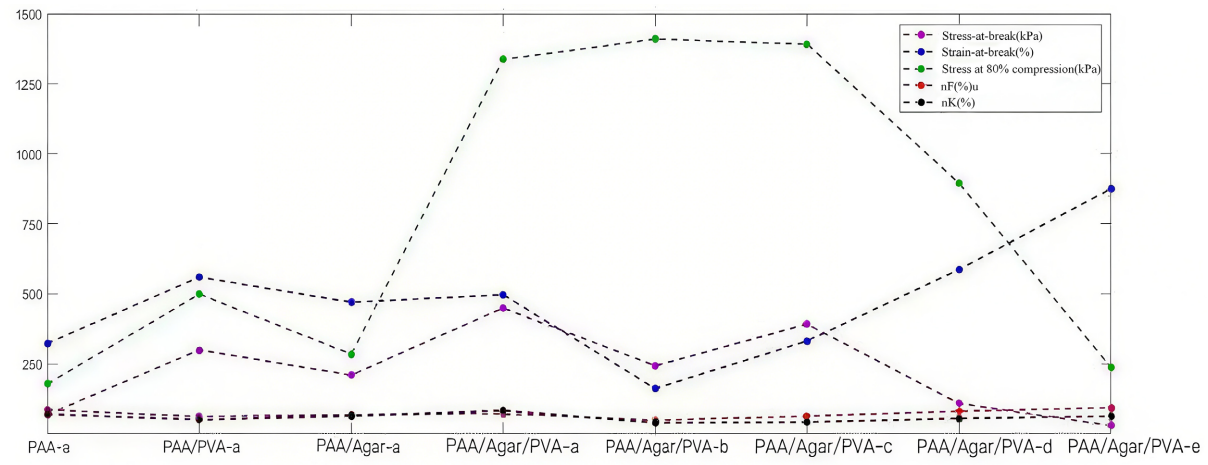


Figure 5. Line chart of performance data for different hydrogels
图 5. 不同水凝胶的性能数据折线图

图 5 是 PAA/Agar/PVA 水凝胶, PAA/PVA 水凝胶, PAA/Agar 水凝胶和 PAA 水凝胶的机械性能数据, 呈现了不同水凝胶的性能数据变化曲线, 能够更直观地观察到不同水凝胶之间的差距。

温度对水凝胶的影响

在本研究中, 通过多维度实验手段对水凝胶的温敏特性进行了系统表征。在不同的温度下需要的水凝胶种类不同, 温度响应弯曲驱动水凝胶的制备可以通过制备双层水凝胶实现, 即其中一层不添加温敏试剂, 另外一层添加温敏试剂。当环境温度发生变化时, 添加层的水凝胶会发生体积变化, 不添加层的水凝胶会牵制添加层水凝胶的变化, 从而使整个水凝胶发生弯曲。到目前为止已有许多的温敏性水凝胶被研发, 温度响应性水凝胶种类繁多, 一般按照温敏性水凝胶的热溶胀机理可以分为热缩型和热胀型两大类。Yao 等人通过将 PNIPAM 与纳米粘土复合制备具有温度响应弯曲特性的水凝胶, 并通过实验得出 PNIPAM-纳米粘土复合水凝胶的热响应弯曲特性是由不同水凝胶层的热致异步收缩导致的。粘土含量可影响水凝胶的热响应弯曲方向和程度, 而且制备的 PNIPAM-纳米粘土水凝胶具有快速、可逆和可重复的热响应性。这些特性使其成为“智能”传感器材料的候选材料。Zhang 等研究团队以 PNIPAM-环糊精为温敏层, 聚丙烯酰胺-金刚烷为固定层制备得到了具有温敏可形变弯曲的水凝胶, 该水凝胶具有很好的温敏可逆特性, 当环境温度为 50℃左右时, 水凝胶发生弯曲, 当温度降到室温(20℃)时, 水凝胶恢复到原来的形状。其温敏弯曲效果见图 6。

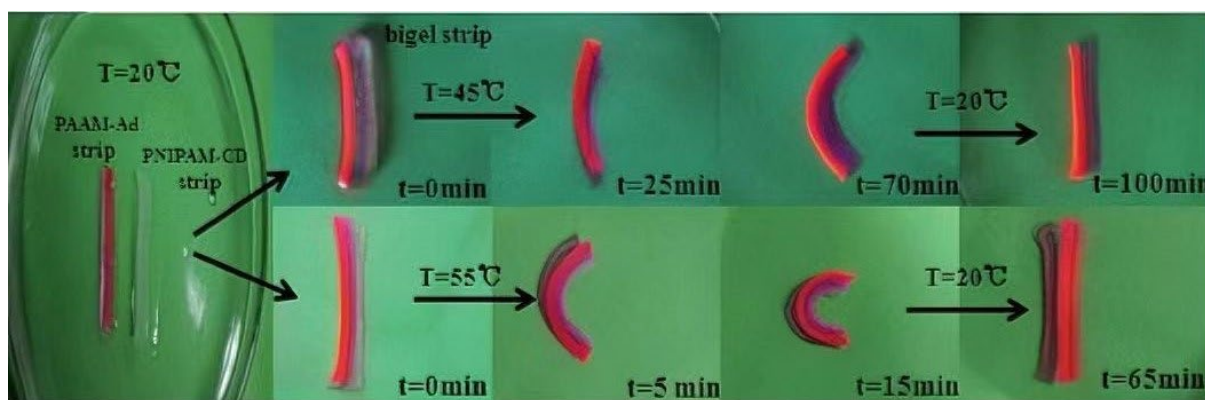


Figure 6. Photographs of bending behavior of hydrogels at different temperatures

图 6. 水凝胶在不同温度下的弯曲行为照片

PH 对水凝胶的影响

水凝胶的溶胀行为是其重要特性之一, pH 主要通过影响高分子链上的离子化基团来改变溶胀程度。pH 响应性高分子水凝胶的内部通常存在易质子化的弱碱性或弱酸性基团, 当外界环境 pH 值发生变化时, 这些特殊基团会产生电离现象, 使凝胶网络内部与外界环境的离子浓度发生改变, 从而使存在于聚合物分子间的氢键作用发生改变, 导致凝胶内部渗透压改变, 最终使凝胶的体积或形态变化, 使其作出对环境 pH 的响应。pH/温度响应性水凝胶控释体系 pH 响应性水凝胶种类繁多, 其中聚丙烯酸类水凝胶是目前最为常见的一种, 当外界环境 pH 值较低时($\text{pH} < 7.0$), 聚丙烯酸类水凝胶中的羧基被质子化, 凝胶中的 $-\text{COOH}$ 易于与其它基团(羟基、氨基等)形成氢键, 使其在凝胶体系中容易形成配合物, 这时大分子主链疏水, 凝胶发生收缩, 吸水性降低; 相反, 当外界环境 pH 值较高时($\text{pH} > 7.0$), 凝胶内部的羧基被去质子化, 羧基与其它基团的氢键作用减弱, 羧基开始发生解离, 使大分子主链向亲水方向转变, 凝胶容易吸水溶胀, 体积增加。根据这些性质可在不同的农业生产中合理选择不同水凝胶。而未来研究则需进一步优化 pH 响应的灵敏度和可控性, 提升水凝胶在复杂环境中的稳定性和实用性。

4. 结论

目前,我国广泛应用的农业传感器主要可分为土壤类、环境类和农作物类,覆盖了农作物播种和生长等主要环节,通过布设传感器能够有效监测和控制我国的各项农业生产环节[7]。而水凝胶纳米材料以其独特的尺寸效应和优异性能,将在提高传感器灵敏度和稳定性方面发挥重要作用[8]。本研究通过对 PAA/Agar/PVA 水凝胶的结构分析验证了 PAA/Agar/PVA 水凝胶的合成方式以及力学性能,研究了不同 Fe^{3+} 含量的 PAA/Agar/PVA 水凝胶的力学强度。随着 Fe^{3+} 含量的增加, PAA/Agar/PVA 水凝胶的抗压强度降低,以此证明 Fe^{3+} 的存在可以影响水凝胶的力学性能。通过调节三种聚合物中 Fe^{3+} 的含量和组成,可以控制水凝胶的自修复性、机械强度和抗疲劳性,通过对此性质的合理利用可以极大地提高农业中水凝胶的应用。当前,水凝胶在农业传感器方面已有不少应用。在土壤环境监测上,其吸胀性能使其能高效吸收土壤水分,依据环境变化释放,以此实现对土壤湿度的实时精准监测,将湿度信息转化为电信号或光学信号供农民参考;凭借可控释放能力,水凝胶吸收土壤养分后,通过控制释放过程,可实时反馈土壤养分含量,助力农民精准施肥,提高肥料利用率并减少环境污染,同时,它对土壤酸碱性物质的吸收及释放控制,能够帮助获取土壤酸碱度值,指导农民合理调整种植策略。在作物健康监测方面,导电水凝胶可作为生物传感器,非侵入式地监测植物相对水分含量,及时反映植物水分状态,辅助判断植物健康状况。从未来趋势看,一方面,水凝胶传感器将朝着多功能集成方向发展,同时监测土壤湿度、温度、pH、养分以及作物生理状态等多参数,为精准农业提供全面数据支撑;并与物联网、人工智能技术融合,实现智能化与自动化,自动生成生产决策建议并控制相关设备。另一方面,与基因编辑、生物工程等前沿技术结合,提升对作物生长和健康的监测调控能力,以及开发可降解、生物相容性好的水凝胶材料,降低成本以实现规模化应用,也将是重要的发展方向,从而推动农业向高效、精准、可持续方向转型。如今农业生产方式的不断革新,为农业传感器技术及其市场的发展带来了巨大机遇和挑战[9]。相信随着农业传感器技术基础研究的不断深入、研发投入的持续加大,以及多学科交叉融合的高效推进,未来农业传感器领域在原理创新、技术发展与应用拓展等方面必将呈现蓬勃发展的态势,相关市场也将日趋成熟完善,为我国乡村振兴战略的实施提供更强有力的支撑。

基金项目

本文系 2025 年省级大学生创新创业训练计划项目“多功能导电生电水凝胶在农田传感器中应用研究”(S202512715075);西京学院横向课题项目“基于物联网技术的农业病虫害监测与预警系统设计与开发”(2024610002007399)的研究成果。

参考文献

- [1] 彭芸,张馨,卢有枝.智能传感器与数据分析在精准农业机械中的应用[J].农机使用与维修,2024(9):141-143.
- [2] 闫梦丹.自愈合凝胶的制备及其力学传感性能研究[D]:[硕士学位论文].郑州:河南农业大学,2022.
- [3] 吴睿,梁靓,李奕怀,郭家伟.水凝胶及应用研究进展[J].化工新型材料,2025,53(5):248-254.
- [4] 谷世豪.pH/温度双响应性松香基控释水凝胶体系的构筑及生物活性研究[D]:[硕士学位论文].咸阳:西北农林科技大学,2024.
- [5] 王义西.多功能三网络水凝胶的构建及在农田传感器中的应用研究[D]:[博士学位论文].石河子:石河子大学,2019.
- [6] 诸葛承耀,黎顺洋,吕汪洋,李楠.界面增强双网络水凝胶织物的制备及性能[J].丝绸,2025,62(1):57-68.
- [7] 张达胜.传感器技术在智慧农业建设中的应用进展[J].农业机械,2024(7):66-69.
- [8] 王莉娜.高性能水凝胶植物应变传感器设计制备及应用研究[D]:[硕士学位论文].南昌:江西科技师范大学,2024.
- [9] 刘羽飞,何勇,刘飞,许丽佳,冯旭萍,唐宇,王正肖.农业传感器技术在我国的应用和市场:现状与未来展望[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2023,49(3):293-304.