AA/AM/AMPS/SDs复合型高吸水性树脂的合成及性能研究

于 智，王兴佳

（沈阳化工大学材料科学与工程学院，辽宁 沈阳 110142）

摘 要：以丙烯酸（AA）、丙烯酰胺（AM）和2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸（AMPS）为单体，以改性木屑（SDs）为填料，以丙酮为致孔剂，采用反相悬浮聚合法制备AA/AM/AMPS/SDs多孔结构的复合型高吸水性树脂，系统研究SDs含量、水油比、引发剂含量、交联剂含量、AA中和度和丙酮添加量对高吸水性树脂吸液性能及保水性能的影响。结果表明：在水油比为1.0∶2.5、SDs质量分数为1.25%、引发剂质量分数为0.5%、交联剂质量分数为0.03%、AA中和度为75%以及丙酮添加量占水相体积25%的条件下，高吸水性树脂性能最佳，吸水倍率达2 904.15 g/g，吸盐水倍率达213.82 g/g。添加丙酮制备的高吸水性树脂具有良好的保水性和重复使用性能。添加改性SDs和丙酮能够有效改善高吸水性树脂的吸液性能。

关键词：高吸水性树脂；木屑；反相悬浮聚合法；致孔剂

中图分类号：TQ322 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3360（2026）09-0014-05

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.003

Synthesis and Performance Study of AA/AM/AMPS/SDs Composite Superabsorbent Resin

YU Zhi, WANG Xingjia

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: Using acrylic acid (AA), acrylamide (AM), and 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPS) as monomers, modified sawdust (SDs) as filler, and acetone as a porogen, a composite superabsorbent resin with a porous structure, designated as AA/AM/AMPS/SDs, was prepared via inverse suspension polymerization. The effects of SDs content, water-to-oil ratio, initiator content, crosslinker content, neutralization degree of AA, and acetone dosage on the liquid absorbency and water retention performance of the superabsorbent resin were systematically investigated. The results showed that under the conditions of a water-to-oil ratio of 1.0 ∶ 2.5, an SDs mass fraction of 1.25%, an initiator mass fraction of 0.5%, a crosslinker mass fraction of 0.03%, a neutralization degree of AA of 75%, and an acetone dosage accounting for 25% of the aqueous phase volume, the superabsorbent resin exhibited optimal performance, with a water absorption ratio of 2 904.15 g/g and a saline absorption ratio of 213.82 g/g. The superabsorbent resin prepared with acetone demonstrated good water retention and reusability. Adding modified SDs and acetone can effectively improve the liquid absorbency of superabsorbent resins.

Keywords: Superabsorbent resin; Sawdust; Inverse suspension polymerization; Porogen

高吸水性树脂是一种由亲水性化合物经过化学或物理交联而获得的具有三维立体网络结构的高分子聚合物，一般包含着许多的羟基、羧基和磺酸基等亲水基团。它们既不溶于水也不溶于有机溶剂[1-2]，但可以吸收自身质量百倍甚至千倍以上的水分，在吸水后形成的凝胶具有介于固体和液体之间的双重特性，即使是在高温高压的条件下，也具有优良的保水性能[3]。

近年来，生物基可降解高吸水性树脂因环境友好性而备受关注[4-5]。开发成本低廉、吸液性能优异且环境负荷小的吸水材料，已成为当前该领域的研究热点[6]。其中，以淀粉、木屑(SDs)纤维素等天然多糖作为填料，是制备生物基可降解高吸水性树脂的有效技术路径。这类生物质材料表面富含羟基，可通过接枝共聚反应与树脂基体构建更稳定的三维网络结构，进而大幅提升吸水树脂的吸液性

收稿日期Submitted date 2025-08-15；修回日期Revised date 2025-09-09；录用日期Accepted date 2025-10-12

联系人，iamyuzhi@126.com

引用本文：于智，王兴佳.AA/AM/AMPS/SDs复合型高吸水性树脂的合成及性能研究[J]. 塑料科技,2026,54(9):14-18.

Citation：YU Z, WANG X J. Synthesis and performance study of AA/AM/AMPS/SDs composite superabsorbent resin[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 14-18.

能[7-8]。需要注意的是，SDs作为一种来源广泛的生物质原料，其成分中包含木质素、半纤维素与纤维素，且分子结构中存在大量亲水性羟基[9]。经过改性处理，可有效去除SDs中的木质素及半纤维素，保留高纯度的纤维素成分。将改性后的SDs纤维素与吸水树脂进行接枝复合，能够进一步优化树脂的三维网络结构，从而显著提升其吸液性能[10]。孙东[11]采用丙烯酸(AA)、丙烯酰胺(AM)、硫酸铁和过硫酸铵(APS)作为原料，添加木质素制备出具有良好的亲水性与耐盐性的高吸水性树脂，有效改善盐碱地的土壤状况。李艳梅等[12]采用木质素磺酸盐为原料，通过水溶液聚合法合成具有较强的吸水性与耐盐性的复合树脂。这一研究方向与现代农业生产中大力倡导的生态环保理念高度契合[13-15]。同时，生物基可降解高吸水性树脂还具备优异的抗盐性、可生物降解性及低环境毒性等特性，在农业节水、卫生用品等领域展现出重要的应用价值与显著的环保意义[16-17]。

本研究以AA、AM、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)为单体进行三元共聚，同时添加改性SDs和致孔剂丙酮，合成具有多孔结构的AA/AM/AMPS/SDs复合型高吸水性树脂，探究不同聚合反应条件对高吸水性树脂吸液性能及保水性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

AA、山梨醇酐单硬脂酸酯(Span-60)、APS、丙酮、硫酸、环己烷，分析纯，天津市大茂化学试剂厂；AM、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(NMBA)，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；AMPS，分析纯，日本东京化成工业株式会社；SDs，湖南省娄底市新化彬彬木业有限公司。

1.2 仪器与设备

扫描电子显微镜(SEM)，JSM-IT800，日本日立公司；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，NEXUS，美国热电尼高力仪器公司。

1.3 样品制备

1.3.1 SDs的预处理

将SDs用粉碎机粉碎后，用200目标准筛过筛。在常温条件下，将一定量的SDs浸泡在质量分数为15%的NaOH溶液中1 h，清洗至pH值呈中性。再用1 mol/L的硫酸在100 ℃条件下降解30 min，用去离子水清洗直至pH值呈中性，放入80 ℃烘箱烘干[18]。

1.3.2 高吸水性树脂的合成

油相配制：将一定量的环己烷、Span-60以及改性处理后的SDs放入四口瓶中，配制成油相。

水相配制：称取定量的AM、AMPS、APS和NMBA，以APS为引发剂，以NMBA为交联剂，混合后加入用质量分数为25%的NaOH溶液中和后的AA溶液中，配制成水相。用恒压漏斗将配制好的水相缓慢滴入配制好的油相中，调整水相的滴加速度。滴加结束后保温30 min，再升温至70 ℃，保温3 h。在此期间加入致孔剂丙酮，将产物用无水乙醇洗涤，干燥5~6 h，得到AA/AM/AMPS/SDs复合型高吸水性树脂。

1.4 性能测试与表征

吸液倍率测定：室温下，称取吸水树脂0.10 g，分别置于500 mL蒸馏水和500 mL生理盐水中，静置。待吸水树脂达到溶胀平衡，用200目筛网滤除多余的水分，然后称出凝胶质量，计算吸水倍率和吸盐水倍率。

重复循环使用性测试：将达到吸水平衡后的树脂置于80 ℃的鼓风干燥箱中烘干至恒重，将烘干后的吸水树脂重复测试吸水倍率5次，得到吸水树脂的重复循环使用性能。

保水性能测试：取定量吸水溶胀达到饱和的吸水树脂，称量质量后放入80 ℃的烘箱中，每隔10 min取出称量质量，直到质量不再变化为止，计算吸水树脂的保水率。

FTIR测试：对KBr压片后的吸水树脂进行透射扫描，扫描范围为4 000~400 cm^{-1}。

SEM分析：选取一定量的吸水树脂粉末样品，喷金后，观测表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 SDs的FTIR分析

图1为SDs改性前后的FTIR谱图。从图1可以看出，经过碱处理后，SDs的某些特征峰吸收强度发生变化，甚至消失，这说明碱煮处理改变了SDs的结构。1 734 cm^{-1}处为半纤维素中乙酰基及木质素或半纤维素中C═O的振动峰；1 640 cm^{-1}处为木质纤维素吸附水形成的特征峰；1 456 cm^{-1}处为C—H和O—H的伸缩振动峰[19]。经过碱煮后，1 734 cm^{-1}处的吸收峰消失，说明SDs中的木质素和半纤维素的结构分子被破坏[20]。1 200 cm^{-1}和1 060 cm^{-1}处为纤维素的特征峰，经过碱处理后峰值开始加强。

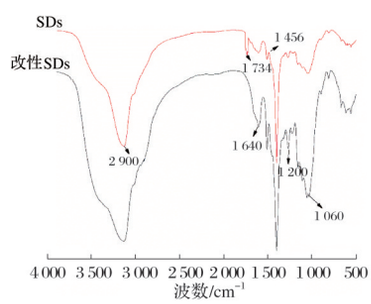


图1 SDs改性前后的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectra before and after SDs modification

2.2 SDs含量对高吸水性树脂性能的影响

图2为SDs质量分数对树脂吸液倍率的影响。从图2可以看出，以AA、AM和AMPS为单体，在反应温度为70 ℃，AA中和度为75%，交联剂含量为单体质量的0.03%，引发剂含量为单体质量的0.50%，水与环己烷质量比(水油比)为1.0∶2.5的条件下，高吸水性树脂的吸液倍率随改性SDs含量的增加呈先升高后降低的趋势。当SDs

质量分数为1.25%时，吸液倍率达到最大值，吸水倍率和吸盐水倍率分别为2 159.67 g/g和201.85 g/g。这主要是因为SDs中含有丰富的纤维素，经碱改性后结构变得更为疏松，大量羟基暴露在外，提高了纤维素的反应活性。这些羟基可与AA中的羧基发生反应，增强产物的吸液性能。同时，聚合单体与部分羟基发生接枝共聚，扩展了高吸水性树脂的三维网络结构，从而显著提高吸液倍率。然而，当SDs含量超过单体质量的1.25%时，其吸液性能明显下降。这是由于过多的接枝中心使生成的聚合物链较短，链的伸展能力受限，致使高吸水性树脂溶胀能力减弱，吸液倍率降低[21]。

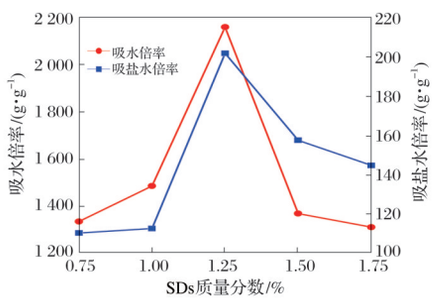


图2 SDs质量分数对树脂吸液倍率的影响

Fig.2 Effect of SDs mass fraction on liquid absorption ratio of resin

2.3 水油比对高吸水性树脂性能的影响

图3为水油比对树脂吸液倍率的影响。从图3可以看出，在聚合反应条件同2.1，固定SDs添加量为单体质量1.25%的条件下，当水油比大于1.0∶2.5时，水相难以在油相中均匀分散，容易发生水滴聚并，导致单体液滴尺寸分布不均，可能生成不规则颗粒或凝胶块，从而降低高吸水性树脂的孔隙率和吸水速率。当水油比为1.0∶2.5时，其吸液倍率达到最大值，水相能够均匀分布于油相中，聚合速率适中，有利于形成有效的交联网络，同时适宜的含水率为聚合物链提供充分的伸展空间，有助于提高分子量，从而增强高吸水性树脂的吸液能力。而当水油比小于1.0∶2.5时，过多的油相可能导致单体液滴尺寸过小，聚合物颗粒过细，较大的比表面积还可能引入更多表面交联，反而使其吸液性能下降。

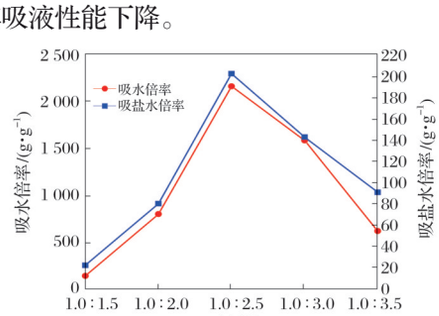


图3 水油比对树脂吸液倍率的影响

Fig.3 Effect of water-to-oil ratio on liquid absorption ratio of resin

2.4 AA中和度对高吸水性树脂性能的影响

当树脂与水接触后，聚合物链上的—COONa基团发生电离，产生Na^+和$—COO^-$离子。羧酸根离子之间的静电排斥力促使聚合物网络扩张，并形成渗透压差。在渗透压的驱动下，水分子从外部不断进入高吸水性树脂交联网络内部，从而使吸液倍率提高。图4为AA中和度对树脂吸液倍率的影响。从图4可以看出，在聚合反应条件同2.2，固定水油比为1.0∶2.5的条件下，AA中和度为75%时，高吸水性树脂，吸水倍率和吸盐水倍率达到最大值。这主要是因为在该AA中和度下，丙烯酸盐阴离子所带电荷量适中，静电排斥作用显著，同时网络内外离子浓度差较大[22]，共同促使分子链三维网络充分伸展，提升了高吸水性树脂的吸水能力。然而，随着AA中和度的继续增加，体系pH值增大。一方面，丙烯酸盐含量的增加减缓了聚合反应速率，导致高吸水性树脂的交联密度降低；另一方面，水溶性聚丙烯酸钠的生成量增多，反而使高吸水性树脂的吸水性能下降。

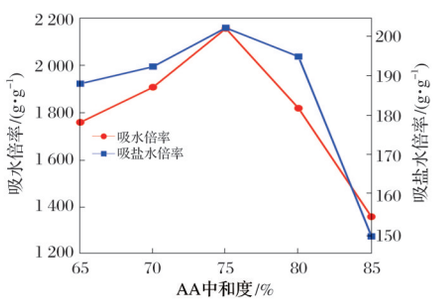


图4 AA中和度对树脂吸液倍率的影响

Fig.4 Effect of AA neutrality on liquid absorption ratio of resin

2.5 引发剂APS含量对高吸水性树脂性能的影响

图5为引发剂质量分数对树脂吸液倍率的影响。从图5可以看出，在聚合反应条件同2.3，固定AA中和度为75%的条件下，当APS含量为单体质量的0.5%时，高吸水性树脂的吸液倍率最高。当APS含量过低时，体系中产生的自由基数量不足，活性位点较少，导致聚合反应活性不高、接枝效率偏低，所形成的三维网络结构不完善，对水分子的束缚能力较弱，水分易流失，因此高吸水性树脂的吸液性能较差。相反，当APS含量适中时，可形成数量适宜的自由基，反应速率合理，有利于生成具有较高分子量且网络结构良好的聚合物[23]。此时，单体转化较为充分，树脂内部亲水基团丰富，能够通过氢键等作用有效结合水分子，促进水分进入高吸水性树脂内部，从而显著提高吸水倍率。

2.6 交联剂NMBA含量对高吸水性树脂性能的影响

图6为交联剂质量分数对树脂吸液倍率的影响。从图6可以看出，在聚合反应条件同2.4，固定引发剂含量为单体质量的0.5%的条件下，交联剂NMBA含量为单体质量的0.03%时，高吸水性树脂的吸液倍率最高。交联剂NMBA含量过低时，难以在聚合物内部形成有效的交联结构，无法构建完整的三维网络，导致高吸水性树脂孔径较大、结构松散，因而吸液能力较差。而当交联剂NMBA过量时，交联点过于密集，网络结构收缩，限制了网络的伸展

和液体的渗透，同样造成吸液倍率下降[24]。

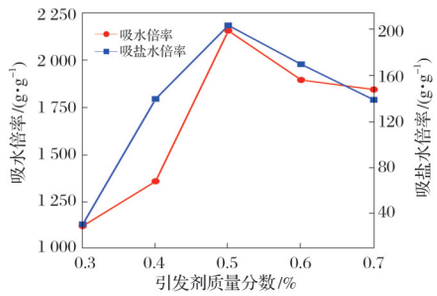


图5 引发剂质量分数对树脂吸液倍率的影响

Fig.5 Effect of initiator mass fraction on liquid absorption ratio of resin

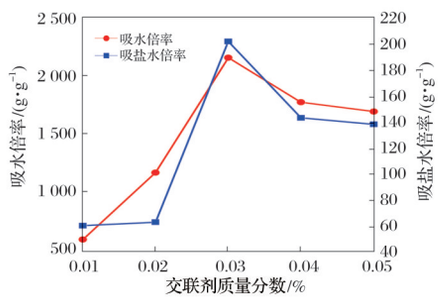


图6 交联剂质量分数对树脂吸液倍率的影响

Fig.6 Effect of crosslinking agent mass fraction on liquid absorption ratio of resin

2.7 致孔剂丙酮添加量对高吸水性树脂性能的影响

图7为丙酮添加量对树脂吸液倍率的影响。从图7可以看出，在聚合反应条件同2.5，固定交联剂含量为单体质量的0.03%的条件下，丙酮添加量为16 mL时，即水相体积的25%，高吸水性树脂的吸液性能达到最佳。此时，吸水倍率和吸盐水倍率分别为2 904.15 g/g和213.82 g/g。引入适量丙酮能够有效增加高吸水性树脂内部的孔隙数量。在一定范围内，随着丙酮添加量的增加，高吸水性树脂的比表面积增大，吸水后网络可扩张的空间也更充分，从而显著提升吸液能力。然而，当丙酮添加量超过16 mL时，过量挥发气体导致孔隙过多、结构强度下降，部分孔洞塌陷使比表面积减小，毛细作用减弱，因此吸液倍率出现下降趋势。

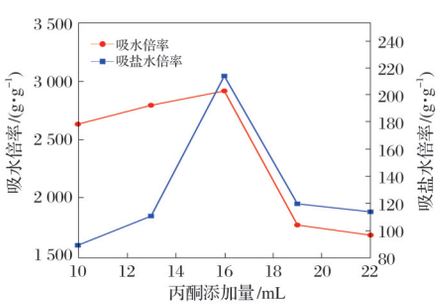


图7 丙酮添加量对树脂吸液倍率的影响

Fig.7 Effect of acetone adding amount on liquid absorption ratio of resin

2.8 高吸水性树脂保水性能分析

图8为高吸水性树脂的保水率。从图8可以看出，在80 ℃加热60 min时，添加SDs的高吸水性树脂保水率为71.33%，而添加丙酮的复合高吸水性树脂保水率达到73.34%；加热至120 min时，两者的保水率分别下降至44.23%和46.35%。对比这两个时间点，添加丙酮的复合高吸水性树脂保水率分别高出改性SDs树脂2.01%和2.12%。综上所述，以丙酮为致孔剂的复合高吸水性树脂具有更优异的保水性能。

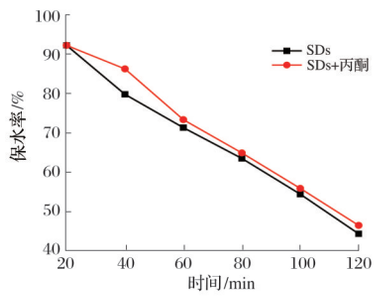
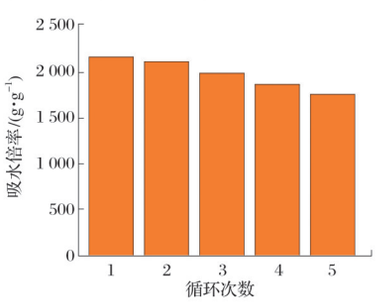


图8 高吸水性树脂的保水率

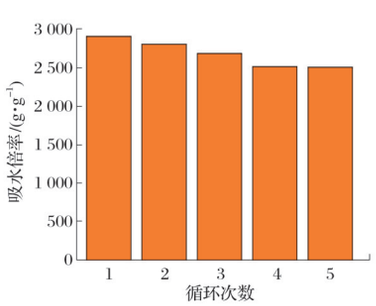
Fig.8 Water retention rate of superabsorbent resin

2.9 高吸水性树脂的重复吸水性

在实际应用中，可循环使用的高吸水性树脂不仅能够提升材料的实用性、降低使用成本，还有助于资源节约和环境保护[25]。本研究通过5次循环吸水实验对AA/AM/AMPS/SDs复合型高吸水性树脂的可重复使用性进行评估。图9为高吸水性树脂的重复吸水性。



(a) 添加SDs的吸水倍率



(b) 添加SDs+丙酮的吸水倍率

图9 高吸水性树脂的重复吸水性

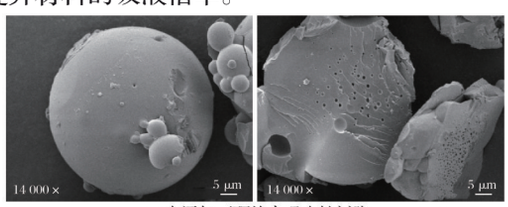
Fig.9 Repetitive water absorption of superabsorbent resin

从图9可以看出，无论是仅添加SDs的树脂还是添加了致孔剂丙酮的高吸水性树脂，均表现出良好的重复吸水性能。仅添加SDs的树脂首次吸水倍率为2 159.67 g/g，前两次循环后吸水倍率下降幅度较小，第三次时仍保持在初次吸水倍率的91.9%。而添加丙酮的高吸水性树脂首次吸水倍率为2 904.15 g/g，第三次时维持于初次水平的

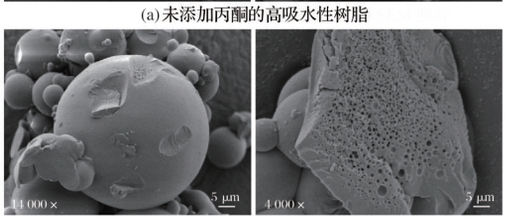
92.4%。随着循环次数的增加，高吸水性树脂的三维网络结构逐渐发生破坏，仅添加SDs的高吸水性树脂在第五次循环时，吸水倍率降至初次值的81.2%；而添加丙酮的高吸水性树脂初次吸水倍率达到86.3%。综上所述，AA/AM/AMPS/SDs复合型高吸水性树脂具有良好的可循环吸水性能，可以循环使用。

2.10 高吸水性树脂SEM分析

图10为高吸水性树脂的SEM照片。从图10可以看出，加入丙酮致孔剂的高吸水性树脂表面更为粗糙，且分布大量孔隙结构。这是由于丙酮在聚合过程中挥发产生气体，致使高吸水性树脂形成更加疏松多孔的结构。这些孔洞有效增大树脂的比表面积，提高与液体的接触面积，显著提升材料的吸液倍率。



(a)未添加丙酮的高吸水性树脂



(b)添加丙酮的高吸水性树脂

图10 高吸水性树脂的SEM照片

Fig.10 SEM images of superabsorbent resin

3 结论

本实验采用反相悬浮聚合法，引入改性SDs，成功制备一种新型AA/AM/AMPS/SDs复合型高吸水性树脂。此外，还添加丙酮作为致孔剂，进一步改善树脂的孔隙结构，从而显著提高其吸水性能、保水性能和重复吸水能力。结果表明：该高吸水性树脂吸水倍率和吸盐水倍率分别达到2 904.15 g/g和213.82 g/g。在保水性能方面，添加丙酮的高吸水性树脂在60 min和120 min的保水率分别较SDs改性树脂高出2.01%和2.12%。经过5次循环吸水实验后，仅添加SDs的树脂吸水倍率下降至初始值的81.2%，而添加丙酮致孔剂的复合树脂能保持初始吸水倍率的86.3%。SEM图像显示，改性后的树脂孔洞数量明显增多，结构更加疏松多孔。制备的AA/AM/AMPS/SDs复合高吸水性树脂具有绿色环保、可循环利用的特点，展现出优异的高吸水性能。

参考文献

[1] WANG X H, WANG Y Y, HE S F, et al. Ultrasonic-assisted synthesis of superabsorbent hydrogels based on sodium lignosulfonate and their adsorption properties for Ni^{2+}[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 221-229.

[2] MALLAKPOUR S, TABESH F. Tragacanth gum based hydrogel nanocomposites for the adsorption of methylene blue: Comparison of linear and non-linear forms of different adsorption isotherm and kinetics models[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 754-766.

[3] FANG S X, WANG G J, LI P C, et al. Synthesis of chitosan derivative graft acrylic acid superabsorbent polymers and its application as water retaining agent[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 754-761.

[4] 王凤, 张亚增, 邓松林, 等. 生物基多糖的疏水改性及其在纸基材料中的应用进展[J]. 中国造纸学报, 2024, 39(3): 10-19.

[5] 吕恭丞, 刘君鹏, 马广居, 等. 高吸水性树脂的分类、合成及其近年来在不同领域的研究进展[J]. 山东化工, 2024, 53(17): 129-135.

[6] 庾莎莎, 郭雅妮, 何柳, 等. 混合落叶纤维素/腐植酸基高吸水树脂的制备及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2025. 53(12): 237-243.

[7] FU E, ZHANG S, LUAN Y, et al. Novel superabsorbent polymer composites based on α -cellulose and modified zeolite: Synthesis, characterization, water absorbency and water retention capacity[J]. Cellulose, 2022, 29(3): 1727-1737.

[8] 马东卓, 祝宝东, 王鉴, 等. 纤维素基高吸水材料研究进展[J]. 化工进展, 2014(7): 1786-1790.

[9] 郭焱, 李小燕, 李存本, 等. 小麦秸秆制备农用高吸水性树脂[J]. 精细化工, 2006, 23(4): 322-326.

[10] 何晓峰, 谢亚琦, 郭福强, 等. 纤维素基高吸水树脂的制备及应用研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(4): 132-136.

[11] 孙东. 基于木质素-Fe^{3+}氧化还原对构建高吸水性树脂[J]. 热带农业工程, 2023, 47(1): 35-38.

[12] 李艳梅, 贺龙强, 胡鹏, 等. 木质素磺酸盐基高吸水性树脂的制备及农用研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(9): 39-42.

[13] 尹洪清, 赵梅梅, 刘峰, 等. 高吸水性树脂合成方法研究进展[J]. 胶体与聚合物, 2021, 39(4): 190-193.

[14] 任肖肖, 王文亮, 薛艳怡, 等. 纤维素基高吸水材料的制备及性能研究[J]. 林产化学与工业, 2025, 45(2): 96-102.

[15] AI F J, YIN X Z, HU R C, et al. Research into the super-absorbent polymers on agricultural water[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106513.

[16] 刘忠, 魏葆婷, 周芮, 等. 羧甲基纤维素/聚丙烯酸/坡缕石高吸水树脂的制备和性能[J]. 塑料科技, 2022, 50(8): 28-32.

[17] TAKAGAI Y, SHIBATA A, KIYOKAWA S, et al. Synthesis and evaluation of different thio-modified cellulose resins for the removal of mercury (II) ion from highly acidic aqueous solutions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, 353(2): 593-597.

[18] 王祎涵. 电絮凝-改性木屑吸附回收尿液中氮磷的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.

[19] 孙润鹤, 李贤军, 刘元, 等. 高温热处理对竹束FTIR和XRD特征的影响规律[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(2): 97-100.

[20] ELIANA C, JORGE R, JUAN P, et al. Effects of the pretreatment method on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentability of the cellulosic fraction from elephant grass[J]. Fuel, 2014, 118: 41-47.

[21] 于智, 王长安. 羧甲基纤维素钠接枝共聚制备高吸水性树脂[J]. 沈阳化工大学学报, 2012, 26(2): 149-151.

[22] 杨永启, 目仁更, 杜帅, 等. 废弃木材纤维制备高吸水树脂研究[J]. 广东化工, 2020, 47(17): 32-34.

[23] 秦传高, 包聘成, 王通震, 等. 麦秸秆基高吸水性树脂的制备及性能研究[J]. 化工技术与开发, 2022, 51(11): 7-10.

[24] 张燕, 来水利, 穆冰硕. 海藻酸钠/改性锂皂石基高吸水性树脂的制备研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(10): 154-159.

[25] 李辉, 冷莹梦, 郑博英, 等. 杨木-膨润土基复合高吸水树脂的制备、表征和性能[J]. 南昌大学学报(理科版), 2021, 45(5): 494-501.