

还原氧化石墨烯/聚丙烯酰胺水凝胶的制备及表征

王帆, 孙兆麟, 向奉婷, 李丽, 刘宇*

辽宁大学药学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2023年4月12日; 录用日期: 2023年5月25日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

水凝胶是一种包含大量水分子与高分子的三维网络结构, 可以应用于环境监测、生物医学等领域。为了克服传统水凝胶机械强度弱的缺点并合成导电性好的水凝胶。本文采用温和还原法制备了还原氧化石墨烯/聚丙烯酰胺复合水凝胶并对其进行了表征, 通过正交实验对水凝胶进行处方优化, 并采用傅里叶变换红外光谱、扫描电镜等对水凝胶进行表征。分析结果表明: GO/PAM水凝胶体系中的GO被成功还原; rGO在水凝胶中分散均匀无聚集情况; 还原后的水凝胶导电率从 1.29×10^{-4} 增加至 1.79×10^{-4} ; 杨氏模量达到 63 ± 2.68 kPa。合成的导电水凝胶为水污染和环境监测中的实际应用提供有价值的研究基础。

关键词

氧化石墨烯, 聚丙烯酰胺, 水凝胶, 水处理

Preparation and Characterization of rGO Polyacrylamide Hydrogel

Fan Wang, Zhaolin Sun, Fengting Xiang, Li Li, Yu Liu*

School of Pharmaceutical Sciences, Liaoning University, Shenyang Liaoning

Received: Apr. 12th, 2023; accepted: May 25th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

Hydrogel is a three-dimensional network structure containing a large number of water molecules and polymers, which can be applied in environmental monitoring, biomedicine, and other fields. In order to overcome the weak mechanical strength of traditional hydrogels and synthesize hy-

*通讯作者。

drogels with good electrical conductivity. In this study, the rGO/polyacrylamide composite hydrogel was prepared and characterized by mild reduction method. The formulation of the hydrogel was optimized by orthogonal experiments, and the hydrogel was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy. The analysis results showed that GO in the GO/PAM hydrogel system was successfully reduced. rGO was uniformly dispersed in the hydrogel without aggregation. The conductivity of the reduced hydrogel increased from 1.29×10^{-4} to 1.79×10^{-4} . The Young's modulus reached 63 ± 2.68 kPa. The synthesized conductive hydrogels provide a valuable research basis for practical applications in water pollution and environmental monitoring.

Keywords

Graphene Oxide, Polyacrylamide, Hydrogel, Water Treatment

Copyright © 2023 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

未经处理的污水、大量垃圾、石油泄漏等是造成水污染的主要原因。废弃的重金属和工业废物可能会在湖泊和河流中积累，对人类和动物有害[1]。工业废物中的毒素是导致免疫抑制、生殖衰竭和急性中毒的主要原因。霍乱、伤寒等传染病和其他疾病肠胃炎、腹泻、呕吐、皮肤和肾脏问题正在通过污染的水传播。人类健康受到植物和动物营养的直接损害[2]。水污染物正在杀死海草、软体动物、海鸟、鱼类、甲壳类动物和其他作为人类食物的海洋生物。DDT等杀虫剂在食物链中的浓度正在增加。这些杀虫剂对人类有害。水质问题是人类在目前面临的一项重大挑战[3]。

水凝胶是一种具有三维网状结构的高分子材料。由于其独特的吸水性、保湿性和导电性等特性，它被广泛用于农业、工业、医疗、生物工程材料等。去除废水中有机染料的技术有催化降解，氧化还原，离子交换和吸附等，研究人员认为染料废水处理的最有效和最先进的方法是吸附。在众多类型的吸附剂中，水凝胶因其官能团丰富、孔结构多、易于制备和分离等优点而受到研究者的关注[4]。

氧化石墨烯因较大的比表面积、化学稳定性好、表面官能团丰富等特性能够有效吸附水溶液中的污染物，如亚甲蓝(MB)、甲苯二酚黄、Th 离子染料[5]。导电水凝胶在电化学传感器和吸附方面的应用十分广泛，应用于环境和生物分析[6]。rGO导电性大于GO，但rGO是疏水性的，并且容易在水溶液中聚集，制备复合水凝胶有困难[7]。本文开发了一种简单有效的方法来生产含有rGO的导电水凝胶。先用GO生成复合水凝胶，再还原GO。

2. 实验部分

2.1. 实验原料及仪器

天然石墨(800目)，浓硫酸(95%~98%)均产自天津市永大化学试剂有限公司；硝酸钠山东禹王实业有限公司；高锰酸钾产自国药集团化学试剂有限公司；30%双氧水产自天津莱博化工有限公司；丙烯酰胺单体(AM)，N，N'-亚甲基双丙烯酸胺(BIS)产自Amresco；过硫酸钾(KPS)产自天津莱博化工有限公司。

实验仪器见表1。

Table 1. Table of experimental equipment**表 1.** 实验仪器表

实验设备	型号	厂家
梅特勒电子天称	AL204	梅特勒-托利多仪器有限公司
集热式恒温加热磁力搅拌器	DF-101S	西安莫吉娜仪器制造有限公司
高速台式冷冻离心机	TFL-20M	上海实维实验仪器技术有限公司
真空干燥箱	DZF-6020	巩义市予华仪器有限责任公司
超声波清洗器	KQ5200E	昆山市超声仪器有限公司
紫外分光光度计	UV2550	日本岛津分析仪器有限公司
红外光谱仪	IRAffinity-1	日本岛津分析仪器有限公司
粒度仪	Nano-zs 90	英国 Malvern 仪器有限公司
扫描电子显微镜	EM-7610F Plus	日本电子株式会社
调温电热套	KDM	山东鄞城华鲁电热仪器有限公司
低温恒温反应浴	DFY-5L/20	巩义市予华仪器有限责任公司
X 射线衍射仪	D8 ADVANCE	德国 Bruker
万用拉伸试验机	WSKN-2000	上海倾技仪器仪表科技有限公司

2.2. 氧化石墨烯(GO)的制备与表征

2.2.1. 氧化石墨烯(GO)的制备

精密称取石墨粉 6.0 g 和硝酸钠 3.0 g 依次加入浓硫酸中, 在低温($<5^{\circ}\text{C}$)下进行磁力搅拌。在 1 h 内分次将 18 g 高锰酸钾加入, 溶液由黑色变成草绿色, 并且析出细小颗粒。将装置在 35°C 油浴中反应 30 min, 待温度升至 35°C 后继续反应 30 min, 最后调温至 85°C , 反应 30 min。反应过程中, 溶液变得粘稠, 最终得到褐紫色的稠状物。将其置于室温下密封静置三天, 静置后的产物转移至盛有 300 ml 猝灭剂热水的烧杯中, 将剩余的产物用 200 ml 热水合并至上述的烧杯中, 边搅拌边加入 6 至 8 滴的猝灭剂 30% 的双氧水。将上述亮黄色的混悬液趁热离心, 离心条件为 10000 r/min, 10 min, 收集上清液于废瓶中, 沉淀用热水洗涤, 搅拌均匀, 以上述相同离心条件再次离心。重复多次上述步骤直至上清液变成无色, 沉淀由亮黄色转变为黑褐色稠状物。将黑褐色稠状物转移至玻璃表面皿中, 放在 -4°C 冰箱中 24 h, 转移至 -80°C 冰箱中 24 h, 然后置于提前预热预冻的冷冻干燥机中干燥 48 h, 最终得到黄棕色的片状固体氧化石墨烯。

2.2.2. 氧化石墨烯分散液的制备

称取上述自制的氧化石墨烯称加入蒸馏水, 用超声波清洗器进行超声, 超声条件为 30 min, 25°C 。将分散液置于装有冰袋的塑料烧杯中, 在细胞超声破碎仪中破碎, 破碎后的分散液于 8000 r/min, 8 min 的离心条件下离心并收集上清液得到最终均匀分散氧化石墨烯分散液。分散液的颜色随浓度的升高变深。

2.2.3. 氧化石墨烯(GO)的表征

1) 粒径与 Zeta 电位分析

将上述 0.1 mg/ml 的氧化石墨烯分散液利用 Nano-zs 90 粒度仪对 GO 的粒径和 Zeta 电位进行分析。

2) 紫外光谱(UV)分析

将上述 0.1 mg/ml 的氧化石墨烯分散液稀释 10 倍, 用 UV2550 紫外分光光度计在 200~800 nm 的波长范围内进行测试, 使用去离子水作为空白对照品。

3) 红外光谱(IR)分析

精密称取 100 mg 2.2.1 中的 GO, 研磨后与 5 mg 的 KBr 混合压片, 使用 IRAffinity-1 型红外光谱仪在 400 至 4000 cm^{-1} 范围进行扫描, 得到 GO 的红外图谱。

4) 扫描电子显微镜(SEM)分析

将 2.2.1 中的 GO 真空喷金, 以 JEM-7610F Plus 扫描电子显微镜观察其微观表面的形态。

2.3. 水凝胶的制备与表征

2.3.1. 水凝胶的制备

将 2.2.1 中的 GO 按照 2.2.2 的方法配置成所需浓度的分散液, 转移至圆底烧瓶中, 将 AM 单体、BIS、KPS 依次加入 GO 分散液中, 充氮气 2 h 除去反应体系中的氧气, 加入磁力搅拌子, 低温恒温反应浴设置为 5 $^{\circ}\text{C}$, 强烈搅拌 30 min, 然后转移至 25 $^{\circ}\text{C}$ 的水浴中搅拌 4 h (此过程在氮气保护下进行)。待反应体系的流动性变差, 逐渐粘稠时停止搅拌, 继续反应 12 h, 最终得到 GO/PAM 水凝胶。

GO/PAM 水凝胶的制备工艺中, 影响因素包括水凝胶体系中 AM 的组分含量(A), BIS 的组分含量(B), KPS 的组分含量(C)和 GO 的组分含量(D), 正交实验水平为表 2, 采用正交实验对水凝胶的处方进行优化。每个因素设置 3 个水平, 建立 $L_9(3^4)$ 正交表优化 GO/PAM 水凝胶的制备工艺, 以水凝胶的拉伸力作为评估指标, 确定最佳制备工艺。每组样品设置 3 个平行对照。

Table 2. Table of orthogonal experimental levels
表 2. 正交实验水平表

水平	因素 A (AM wt%)	因素 B (BIS wt%)	因素 C (KPS wt%)	因素 D (GO wt%)
1	20%	5%	10%	0.5%
2	25%	10%	20%	1.0%
3	30%	15%	30%	1.5%

将上述制备的 GO/PAM 水凝胶置于 2 mg/ml 的抗坏血酸中在 37 $^{\circ}\text{C}$ 下还原 6、12、24 h, 得到 r(GO/PAM) 6 h、r(GO/PAM) 12 h、r(GO/PAM) 24 h 水凝胶。

2.3.2. 水凝胶的表征

1) 红外光谱(IR)分析

将 2.3.1 制备的水凝胶于冷冻干燥机中干燥 48 h, 得到干的水凝胶, 将其研磨后与适量的 KBr 混合压片, 使用 IRAffinity-1 型红外光谱仪在 400 至 4000 cm^{-1} 范围进行扫描, 得到 GO/PAM 水凝胶的红外图谱。

2) 扫描电镜(SEM)分析

将 2.3.1 制备的水凝胶于冷冻干燥机中干燥 48 h, 得到干的水凝胶, 喷金以 JEM-7610F Plus 扫描电子显微镜观察其微观表面形态。

3) X 射线衍射仪(XRD)分析

将 2.3.1 制备的水凝胶于冷冻干燥机中干燥 48 h, 得到干的水凝胶, 将其研磨后通过 X 射线衍射仪对合成的水凝胶进行分析。

4) 流变性能测试

采用电子万能试验机, 在速率为 100 mm/min 的 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下对样品通过拉伸试验进行考察。

5) 水凝胶的导电性测试

将水凝胶剪切成厚 0.5 cm，直径 2 cm 圆柱形的水凝胶，随后将水凝胶试样圆形的两端用导电胶带连接到万用表上，来测量其电阻。电导率 σ 的计算公式如下：

$$\sigma = \frac{L}{RS}$$

3. 结果与讨论

3.1. GO 的表征

3.1.1. Size 与 Zeta 电位测试

如图 1 所示，0.1 mg/ml 的氧化石墨烯分散液中 GO 的粒径(Size)为 254.4 ± 8.7 nm，PDI 值为 0.195 ± 0.026 ，三个平行组的 PDI 值均小于 0.3，证明样品的尺寸均一，Zeta 电位值为 -38.5 ± 0.66 mV，表明氧化石墨烯分散液分散性好，粒径均匀并且稳定性良好。

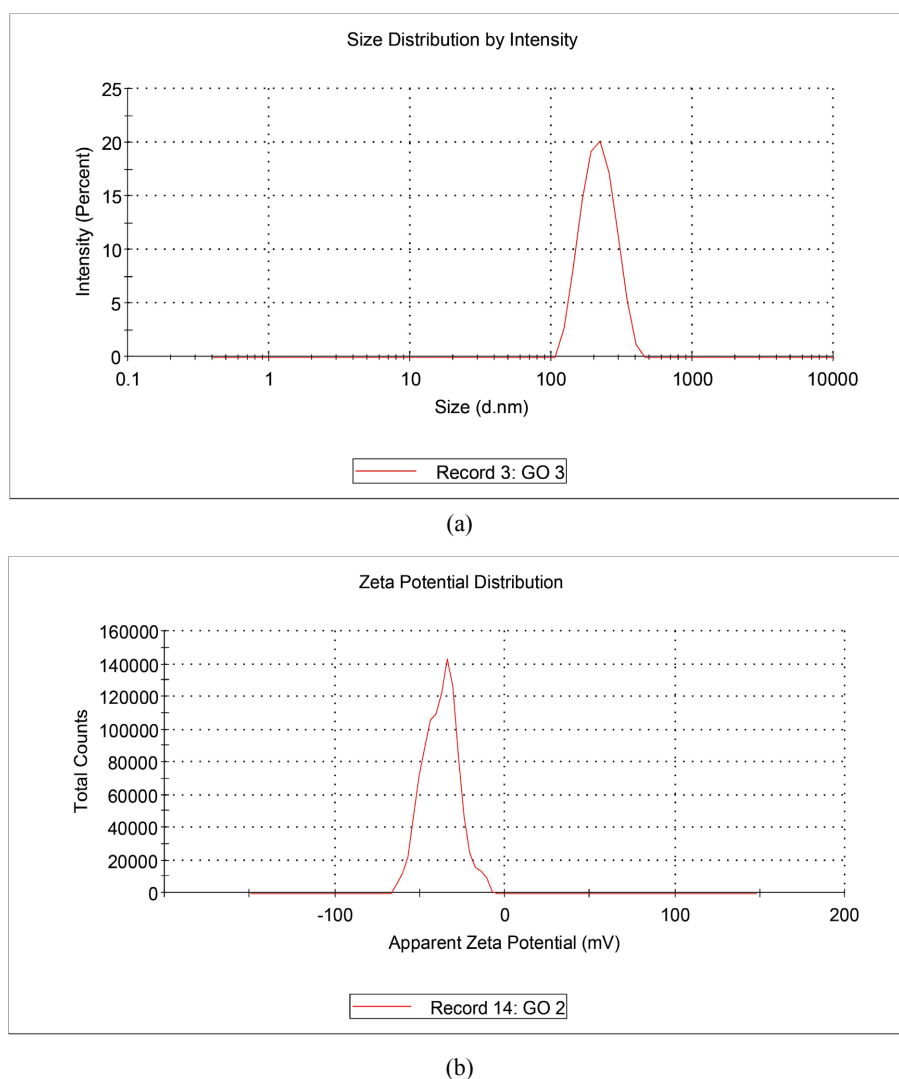


Figure 1. Particle size distribution (a) and Zeta potential (b) of GO
图 1. GO 的粒径和电位分布图

3.1.2. 紫外光谱(UV)分析

稀释后的氧化石墨烯分散液的紫外光谱如图 2(a)图所示, 在 225 处有最大吸收波长, 这是由于氧化石墨烯结构中 C=C 的 π 电子跃迁导致的。紫外图谱的结果表明, GO 的成功合成。

3.1.3. 红外光谱(IR)分析

GO 的红外光谱图如图 2(b)右图所示, 位于 3390 cm^{-1} 处有较宽的吸收峰, 分析可能是引入了 -OH; 1735 cm^{-1} 和 1624 cm^{-1} 分别代表 C=O 和 C=C 的伸缩振动峰的出现, 说明在石墨中引入了含氧官能团; 1411 cm^{-1} 是羧基的 C-OH 伸缩振动峰, 1225 cm^{-1} 与 1056 cm^{-1} 处的吸收峰均为 C-O 基团。这些峰证实天然石墨粉中引入大量的含氧官能团, GO 成功合成。

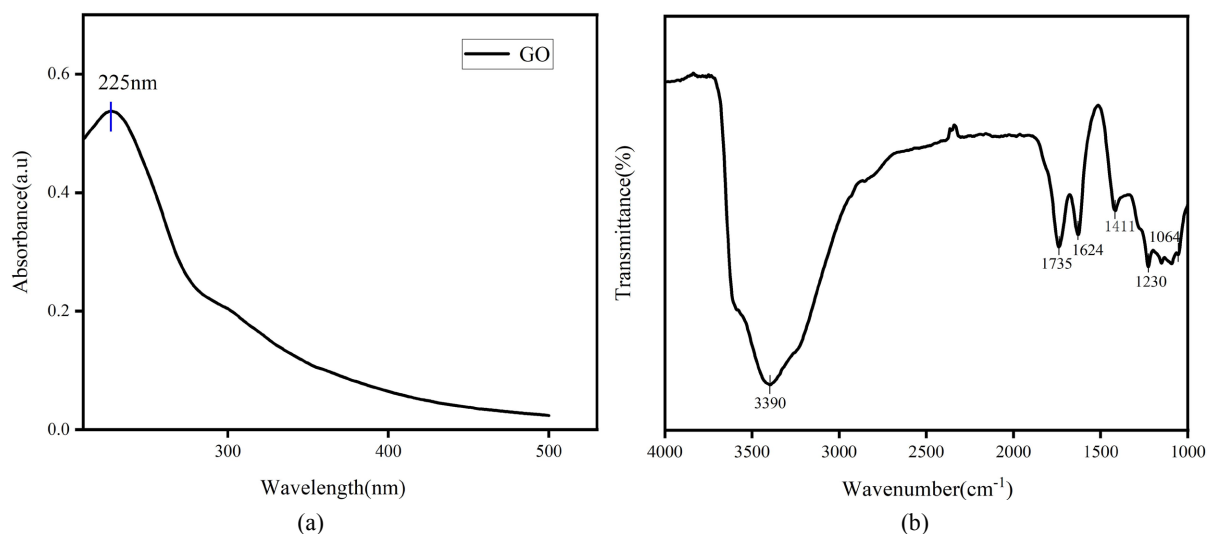


Figure 2. UV spectrum (a) and Infrared spectrum (b) of GO
图 2. 氧化石墨烯的紫外光谱图(a)及红外光谱图(b)

3.1.4. 扫描电镜(SEM)分析

根据图 3 左图所示, GO 呈现单层或者多层的片状结构, 猜测可能是由于天然的石墨粉经过 KMnO_4 的强烈氧化, 石墨粉被氧化成细小的碎片, 引入的含氧官能团使得片层间作用力减弱。超声、离心、破碎等步骤的震荡冲击, 从而引起片层剥离。这些片层结构赋予了 GO 较大的比表面积。右图可以观察到 GO 的片层结构并且有很多细小的褶皱, 这是由于在合成过程中 sp^3 杂化的碳原子中引入了 sp^2 杂化的碳原子, 使石墨粉表面形成含氧官能团。合成的 GO 需要通过表面原子重组和相互反应降低表面能使合成的 GO 表面更稳定[8]。合成 GO 单层或多层带褶皱较大的比表面积使得吸附位点充分暴露, 从而提高吸附容量。

3.2. 水凝胶的结构表征

3.2.1. 水凝胶的处方优化

由 GO/PAM 水凝胶处方优化的正交试验结果表 3 可知。影响水凝胶拉伸力的因素是: $A > D > B > C$, 最佳处方是 $A_2B_1C_1D_3$, 即水凝胶体系中 AM 的组分含量为 25%, BIS 的组分含量为 5%, KPS 的组分含量为 10%, GO 的组分含量为 1.5%, 水凝胶的最大拉力可达 $0.34 \pm 0.29\text{ N}$ 。

3.2.2. 红外光谱(IR)分析

水凝胶的红外光谱图如图 4 所示, PAM 水凝胶中, 3320 cm^{-1} 处有较宽的吸收峰, 推测可能是 N-H 的

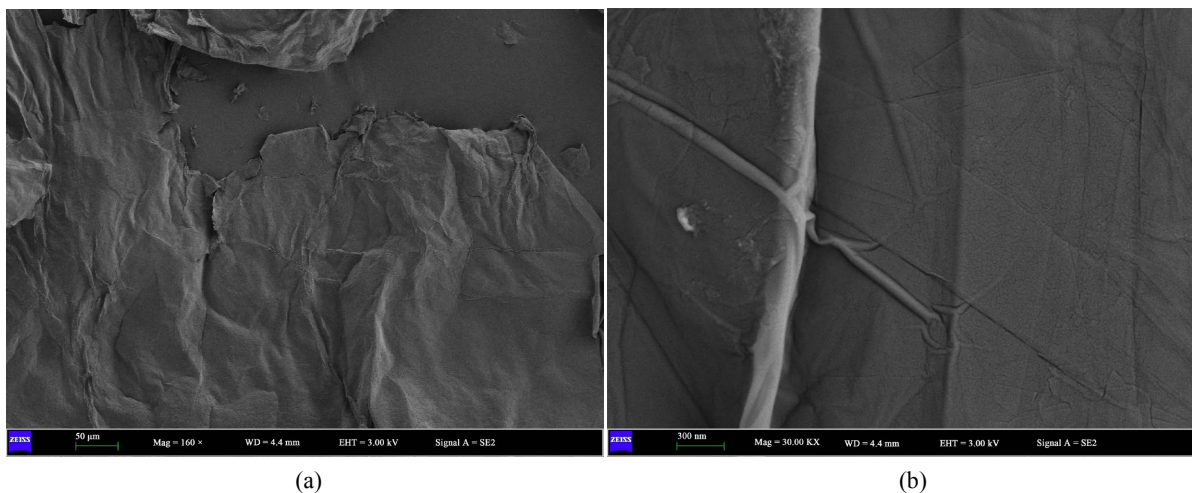


Figure 3. SEM spectrum of GO
图 3. GO 的扫描电镜图

Table 3. Results of orthogonal experiments
表 3. 正交试验结果

编号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	最大拉力(N) ($\bar{x} \pm s$)
1	1	1	1	1	0.02 ± 0.007
2	1	2	3	2	0.03 ± 0.012
3	1	3	2	3	0.06 ± 0.009
4	2	1	3	3	0.31 ± 0.016
5	2	2	2	1	0.22 ± 0.017
6	2	3	1	2	0.15 ± 0.003
7	3	1	2	2	0.09 ± 0.033
8	3	2	1	3	0.28 ± 0.021
9	3	3	3	1	0.12 ± 0.014
K ₁	0.11 ± 0.028	0.68 ± 0.036	0.49 ± 0.068	0.36 ± 0.038	
K ₂	0.68 ± 0.036	0.53 ± 0.050	0.37 ± 0.059	0.27 ± 0.048	
K ₃	0.49 ± 0.068	0.33 ± 0.026	0.46 ± 0.042	0.65 ± 0.046	
k ₁	0.037 ± 0.009	0.23 ± 0.012	0.16 ± 0.022	0.12 ± 0.012	
k ₂	0.23 ± 0.012	0.18 ± 0.017	0.12 ± 0.020	0.09 ± 0.016	
k ₃	0.16 ± 0.023	0.11 ± 0.009	0.15 ± 0.014	0.21 ± 0.015	
R	0.57 ± 0.008	0.35 ± 0.010	0.12 ± 0.009	0.38 ± 0.002	
主次顺序			A > D > B > C		
优水平	A ₂	B ₁	C ₁	D ₃	
优组合			A ₂ B ₁ C ₁ D ₃		

伸缩振动峰；2860 和 2670 处的峰是-CH₂-的不对称和对称伸缩振动峰；1503 处是 C=O 的吸收峰，1053 处是酯基上的 C-O 键的吸收峰。GO/PAM 水凝胶在 1411 和 1126 处的吸收峰分别对应 GO 上的 C-OH 和

C-O-C 的伸缩振动峰, 表明 GO 已成功分散于水凝胶体系中。r(GO/PAM)与 GO/PAM 水凝胶有着相似的特征峰, 但在 1410~1430 即 C=O 吸收峰的范围内, 特征峰有所减弱, 这是由于 GO/PAM 中 GO 的部分含氧官能团被还原。证实了三组水凝胶的成功合成。

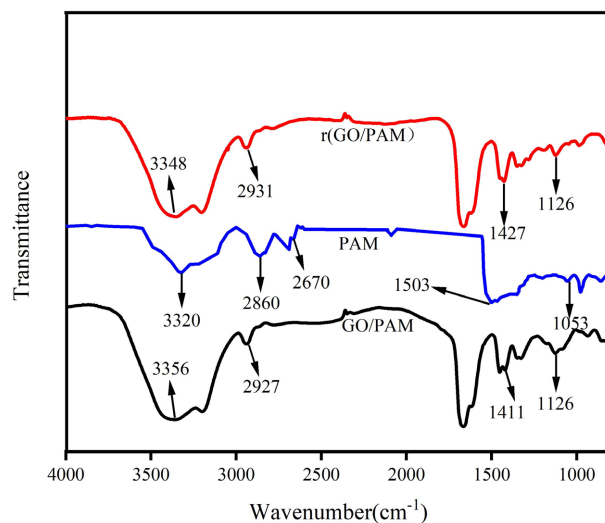


Figure 4. Infrared spectrum of hydrogels

图 4. 水凝胶的红外光谱图

3.2.3. 扫描电镜(SEM)分析

图 5 为 GO/PAM 和 r(GO/PAM)水凝胶的扫描电镜图谱, 左图可以看到水凝胶内部呈现连续而均匀的孔洞, 可能是由于 GO 通过 π - π 作用以及含氧官能团与 PAM 中羟基之间的相互作用形成了均匀网状结构, 这种结构赋予了水凝胶较大的保湿性能和溶胀性能, 能够吸附足够的污染物。右图水凝胶的空隙大小和数量都明显减少, 猜测这可能是由于抗坏血酸将 GO/PAM 中的 GO 还原为 rGO, 由于部分官能团被还原而导致与 PAM 间相互作用减少。并且可以观察到无明显的 rGO 聚集体, 这表明 rGO 在水凝胶中具有良好的分散性, 不易团聚, 适合用于污水处理中。

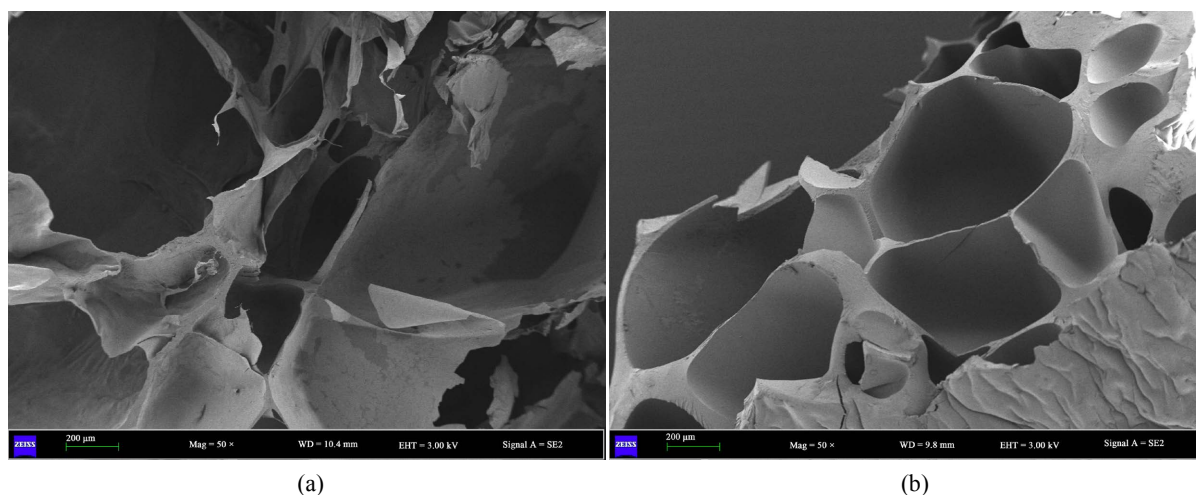


Figure 5. SEM images of GO/PAM and R(GO/PAM) hydrogel

图 5. GO/PAM 和 r(GO/PAM)水凝胶的扫描电镜图谱

3.2.4. X 射线衍射仪(XRD)分析

图 6(a)图是 GO 和不同水凝胶体系的 XRD 结果对比图, 如图所示, 与 GO 相比, 所有水凝胶组在 0 至 20°均无衍射峰的出现, 即 GO 在 10.66°处强的衍射峰消失了, 这说明 GO 在水凝胶中分散均匀, 无明显的聚集。PAM 水凝胶中加入 GO 后, PAM 水凝胶的衍射峰从 24.76°移到了 26.78°, 这是由于 GO 上的含氧官能团与 PAM 聚合物链上的酰胺基团之间的氢键相互作用, 使聚合物之间的距离减小, 导致晶面间距减小。还原后的 GO/PAM 的衍射峰从 26.78°移到了 24.90°, 经分析可能是由于抗坏血酸还原了 GO/PAM 水凝胶中部分 GO 的基团, 含氧官能团减少, 与聚合物链之间的氢键作用力减弱, 距离增大, 晶面间距减小。

3.2.5. 水凝胶的杨氏模量

水凝胶的杨氏模量如图 7(b)所示, 加入 GO 后, PAM 水凝胶的杨氏模量从 27 ± 1.79 增加到了 63 ± 2.68 kPa, 还原后的 GO/PAM 水凝胶的杨氏模量没有明显变化, 可能是因为 GO 上含氧官能团与 PAM 水凝胶之间的相互作用, 比如氢键、疏水相互作用和静电相互作用, 使水凝胶有的结构更加牢固, 有更高的弹性。

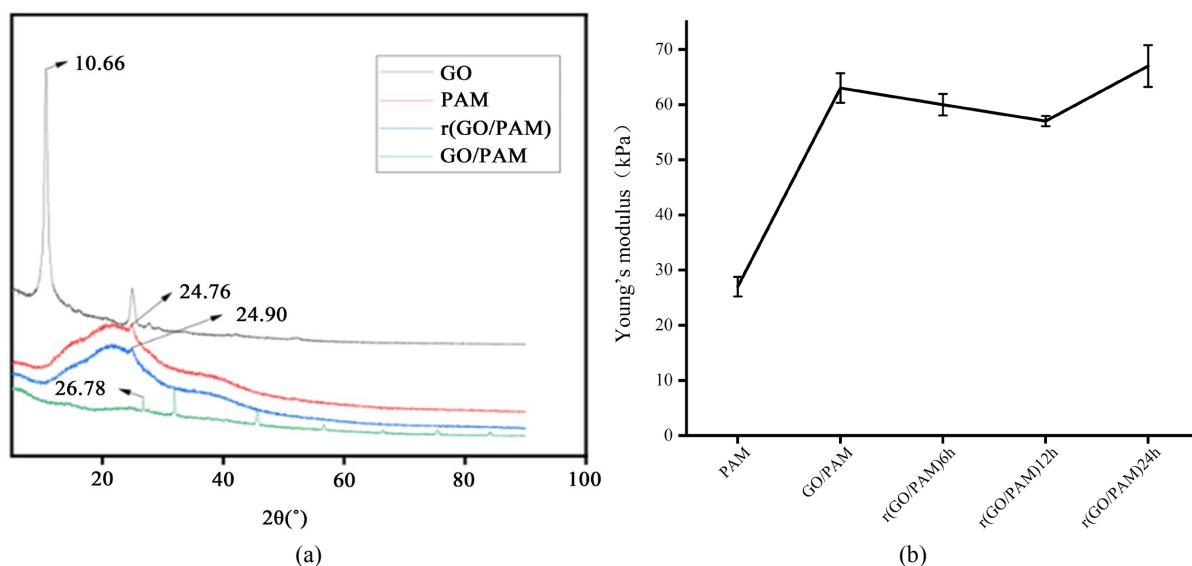


Figure 6. The XRD patterns (a) and Young's modulus (b) of hydrogels

图 6. 水凝胶的 XRD 图谱(a)和杨氏模量(b)

3.2.6. 水凝胶的导电性测试

如图 7 所示, GO/PAM 水凝胶的导电率为 1.29×10^{-4} , 这归因于水凝胶网络结构中加入了 GO, 经还原后的水凝胶的导电率从 1.29×10^{-4} 增加到了 1.79×10^{-4} , 说明 r (GO/PAM)水凝胶的导电性能强于 GO/PAM 水凝胶, 随着还原时间的增加, 导电率也随之增加。

4. 结论

- 1) 通过改良的 Hummers 法成功制备出 GO。
- 2) 粒径与电位结果显示 GO 的粒径为 254.4 ± 8.7 nm, PDI 值为 0.195 ± 0.026 , 电位在 -38.5 ± 0.66 mV, 说明合成的 GO 粒度均匀, 分散良好。紫外光谱、红外光谱均证明在天然石墨粉中引入了大量含氧官能团。扫描电镜观测到 GO 呈多层且带褶皱的片状, 拥有足够的吸附位点。

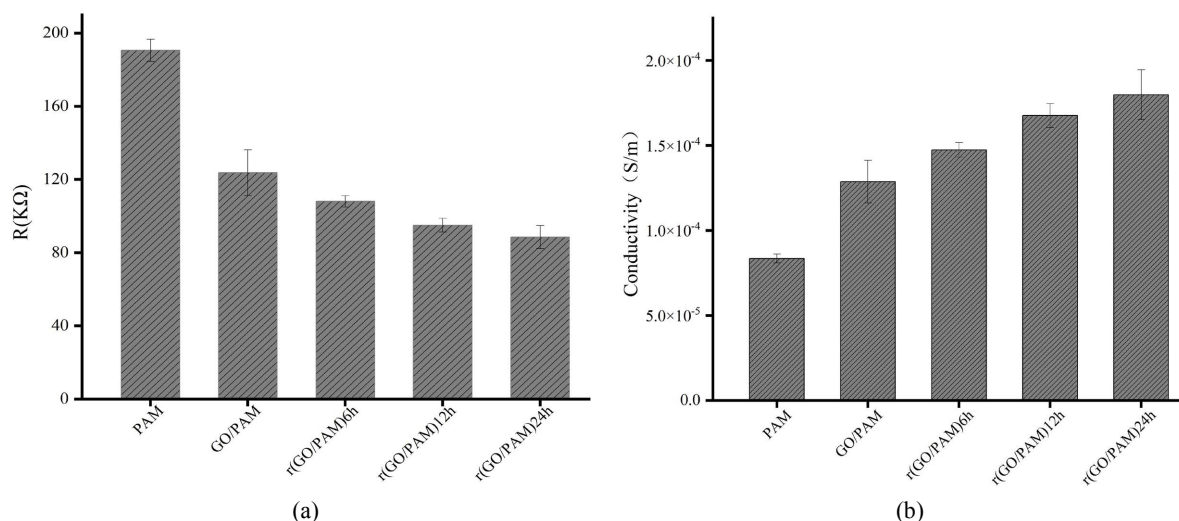


Figure 7. Resistance and Conductivity of hydrogels
图 7. 水凝胶的电阻和导电率

3) 采用正交实验对水凝胶进行处方优化, 正交试验结果表明当 AM、BIS、KPS、GO 的含量分别为 25%、5%、10%、1.5% 时, 水凝胶的拉伸性能最好, 可达 0.34 ± 0.29 N; 采用一种简单有效的方法合成了含有 rGO 的导电水凝胶。

4) 红外图谱、XRD 结果表明 GO/PAM 被成功还原为 r(GO/PAM)。扫描电镜结果显示水凝胶中无明显的 GO 聚集, 解决了 rGO 容易聚集的缺点。流变学结果表示掺入 GO 的 PAM 水凝胶的杨氏模量明显升高, 达到了 1.79×10^{-4} , 并且还原后未改变水凝胶的力学性能。GO 具备较好的导电性, 加入 PAM 水凝胶中增加了水凝胶中的导电率, 还原后的水凝胶组展现出强于未还原组的导电率。

5) 本文采用温和还原法制备了还原氧化石墨烯/聚丙烯酰胺复合水凝胶并对其进行了表征, 为后续导电水凝胶在水污染和环境监测中的实际应用提供有价值的研究基础。

基金项目

本文由辽宁大学“大学生创新创业训练计划项目”资助。

参考文献

- [1] Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., *et al.* (2010) Global Water Pollution and Human Health. *Annual Review of Environment and Resources*, **35**, 109-136. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125342>
- [2] Halder, J.N. and Islam, M.N. (2015) Water Pollution and Its Impact on the Human Health. *Journal of Environment and Human*, **2**, 36-46. <https://bcpslibrarymedia.pbworks.com/w/file/fetch/134977233/Water-Pollution-and-Its-Impact-on-Human-Health.pdf>
- [3] Wang, Q. and Yang, Z. (2016) Industrial Water Pollution, Water Environment Treatment, and Health Risks in China. *Environmental Pollution*, **218**, 358-365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.011>
- [4] Jayakumar, A., Jose, V.K. and Lee, J.M. (2020) Hydrogels for Medical and Environmental Applications. *Small Methods*, **4**, Article 1900735. <https://doi.org/10.1002/smt.201900735>
- [5] Priyadarshini, S.D., Manikandan, S., Kiruthiga, R., *et al.* (2022) Graphene Oxide-Based Nanomaterials for the Treatment of Pollutants in the Aquatic Environment: Recent Trends and Perspectives—A Review. *Environmental Pollution*, **306**, Article 119377. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119377>
- [6] Jo, H., Sim, M., Kim, S., *et al.* (2017) Electrically Conductive Graphene/Polyacrylamide Hydrogels Produced by Mild Chemical Reduction for Enhanced Myoblast Growth and Differentiation. *Acta Biomaterialia*, **48**, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.10.035>

-
- [7] Yi, J., Choe, G., Park, J., *et al.* (2020) Graphene Oxide-Incorporated Hydrogels for Biomedical Applications. *Polymer Journal*, **52**, 823-837. <https://doi.org/10.1038/s41428-020-0350-9>
- [8] 徐博. 基于改进 Hummers 法制备氧化石墨烯的机理分析及其吸附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2022. <https://doi.org/10.27225/d.cnki.gnmgu.2022.000058>