

高能射线辐照技术制备多功能石墨烯复合水凝胶实现海水淡化和废水净化新思路

林 琳^{1,2} 李林繁^{1,2} 李吉豪^{1,2}

¹ (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

² (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 全球水资源短缺和污染问题日益严重,虽然太阳能驱动的界面蒸发已在海水淡化方面得到了高效应用,但无法从根本上有效抵御和解决复杂水系统中有机污染物的侵蚀。本文概述了辐射法制备多功能聚丙烯酰胺基石墨烯/纳米材料复合水凝胶运用在水处理领域的新思路:利用 γ 射线一步实现聚丙烯酰胺单体的聚合、氧化石墨烯和纳米材料的还原。辐射制备的复合水凝胶兼具优异的亲水性和光吸收能力,可有效降低水蒸发焓。通过光热-光催化协同作用,在标准太阳光下实现大于 $3.1\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$ 的蒸发速率,可去除大于99.9%的盐离子,并降解大于85%的有机染料,同时在高盐、强酸等极端条件下保持稳定。这种新型水凝胶在太阳能水净化领域具有重要应用前景。

关键词 光热界面蒸发,光催化,石墨烯,纳米粒子,水凝胶

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0074

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0074

引用该文:

林琳, 李林繁, 李吉豪. 高能射线辐照技术制备多功能石墨烯复合水凝胶实现海水淡化和废水净化新思路[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(6): 061001. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0074.

LIN Lin, LI Linfan, LI Jihao. Multifunctional graphene composite hydrogel prepared by high-energy irradiation technology for seawater desalination and wastewater purification[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(6): 061001. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0074.



Multifunctional graphene composite hydrogel prepared by high-energy irradiation technology for seawater desalination and wastewater purification

LIN Lin^{1,2} LI Linfan^{1,2} LI Jihao^{1,2}

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT The global water shortage and pollution problems are severe. Solar-driven interfacial evaporation is used in seawater desalination, but it can't effectively resist or solve the erosion of organic pollutants in complex water systems. This paper reports a new method of using irradiated polyacrylamide-based graphene/nanomaterial composite hydrogels in water treatment. Gamma rays are used to polymerize acrylamide monomers, oxidize graphene, and reduce nanomaterials. It achieves an evaporation rate of $>3.1\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$ under standard sunlight, removing $>99.9\%$ of salt ions and $>85\%$ of organic dyes while maintaining stability under extreme conditions. This

收稿日期: 初稿 2025-08-18; 修回 2025-10-21

Received 18 August 2025; accepted 21 October 2025

注: 本文研究内容首次发表于 *Desalination* 和 *Chemical Engineering Journal*

novel hydrogel has potential for solar-powered water purification.

KEYWORDS Photothermal evaporation, Photocatalysis, Graphene, Nanoparticles, Hydrogel

CLC TL13

全球水资源危机在城市化加速、人口增长和气候变化的共同作用下持续加剧^[1]。其中，工业废水因其含有大量有机染料和农药等有毒有害物质，对生态系统和人类健康构成严重威胁^[2]。与此同时，化石能源的过度开采迫使人类转向开发清洁可持续的太阳能利用技术，以应对淡水短缺与环境治理的双重挑战^[3]。在此背景下，开发基于太阳能的新型绿色水处理技术具有重要意义。太阳能蒸汽生成(Solar steam generation, SSG)技术可以将太阳能直接转化为热能，在较低温度下实现海水、污水的高效蒸发，生产可饮用淡水。因此，SSG技术在海水淡化和废水净化方面展现出巨大潜力，作为一种具有绿色、可持续的新型能源技术而备受关注。然而，传统的SSG技术往往仅能实现水分的蒸发与收集，无法有效降解水体中的有机污染物，尤其在处理工业废水、含油污水或含有挥发性有机物(VOCs)的复杂水体时，其净化效果十分有限^[4]。此外，有机污染物在蒸发过程中易被浓缩甚至挥发至冷凝水中，导致产水水质下降，严重限制了该技术的实际应用。近年来，研究者尝试将光催化材料引入SSG系统，以实现在蒸发的同时对有机物进行降解，从而提升水质净化效果。

高性能太阳能蒸发-催化协同材料的设计需满足4大关键要素：宽光谱太阳光捕获能力(300~2 500 nm)、连续贯通的水分子传输网络、高效的热局域化效应以及稳定的催化剂负载位点。其中，

基于多孔交联聚合物网络的水凝胶光催化复合材料因其可调控的物理化学特性而展现出独特优势。这类材料的制备工艺主要包括溶液聚合、辐射聚合和逆向乳液法等技术路线。溶液聚合法需引入交联剂和引发剂等添加剂以提高材料力学性能，而辐射化学法则利用 γ 射线或电子束等高能辐射源，通过激发材料分子产生活性自由基，诱导化学键的断裂与重组，在常温常压下实现材料的精准合成与结构调控。与传统化学方法相比，辐射技术具有显著优势：无需添加化学助剂，可避免二次污染；反应条件温和，能实现材料的高效改性；工艺控制精确，适用于多种功能材料的制备^[5-7]。基于这些优势，辐射聚合技术已在生物医学、食品工程和航空航天等领域获得广泛应用。本课题组自2014年以来系统开展了 γ 射线辐照法制备石墨烯基气凝胶和水凝胶的研究工作，重点考察了材料在污染物吸附^[8-9]、油水分离^[10]、催化^[11]、导电性能^[12]和光热转换^[13-14]等方面的应用特性。

本研究利用 γ 射线辐照技术开发了聚丙烯酰胺(PAM)基石墨烯/纳米材料复合水凝胶(图1)，系统探索了吸收剂量(30~200 kGy)与溶液浓度对凝胶制备和性能的影响规律，探究了复合水凝胶在太阳能驱动水净化中的协同脱盐与光催化降解性能，从而实现辐射高分子材料改善淡水资源短缺的新策略。

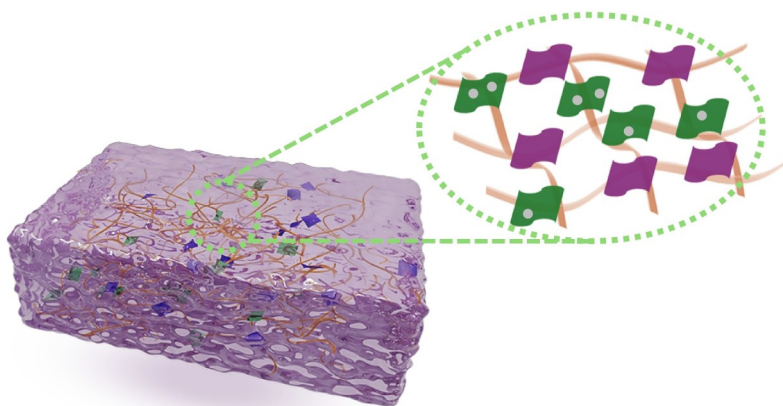


图1 辐射制备聚丙烯酰胺基石墨烯复合水凝胶内部结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the internal structure of irradiation-prepared polyacrylamide-based graphene composite hydrogel

具体方法：将丙烯酰胺(AM)单体、氧化石墨烯(GO)水醇分散液和纳米材料(Ag NPs、Ti₃C₂ MXene)混合均匀后，在 γ 射线辐照下制备多种聚丙烯酰胺基石墨烯/纳米材料复合水凝胶。根据辐射化学的原理，水溶液在 γ 射线作用下辐解产生活性自由基，同时促使AM单体的聚合、交联，以及氧化石墨烯和纳米材料原位还原。该类聚丙烯酰胺基石墨烯/纳米材料复合水凝胶的性能优势主要体现在以下4个方面：(1)在常温常压和低吸收剂量(30~50 kGy)下实现聚丙烯酰胺基石墨烯/纳米材料复合水凝胶的绿色合成；(2)亲水性PAM三维交联网络和高比表面积还原氧化石墨烯(rGO)纳米片共同构建了连续的水分子传输通道和三维多孔结构；(3)具有催化特性的光热纳米材料(Ag NPs、Ti₃C₂ MXene)与具有宽谱吸收和高导电性的rGO纳米片产生协同光热-光催化效应；(4)材料整体具有优异的机械稳定性和环境适应性，在复杂环境(如强酸、强碱等)中保持凝胶形态而不破裂。

利用室内模拟太阳光进行光热蒸发(包括纯水、海水以及污水蒸发)和有机污染物光催化降解测试。由一步辐照法制备的聚丙烯酰胺基石墨烯/纳米材料复合水凝胶展现出卓越的综合性能(图2)：(1)优异的光热转换效率，实现98%以上的光吸收率(200~2 500 nm太阳光谱范围)和水凝胶表面的快速升温(5 min内快速升温至45℃以上)；(2)

出色的光热蒸发性能，在标准太阳光强(1 kW/m²)下实现3.1 kg/(m²·h)以上的光热蒸发速率，优于多数三维水凝胶(因出色的热管理能力促使水凝胶从环境中吸取能量，使光热蒸发效率高达131%)；(3)高效脱盐，在低盐(质量分数3.5% NaCl)、高盐(质量分数25% NaCl)和真实海水中均保持2.6 kg/(m²·h)以上的光热蒸发速率和循环稳定性，海水淡化处理后的冷凝水盐离子去除率大于99.9%，符合世界卫生组织(WHO)饮用水标准(钠离子含量需小于200 mg/L)；(4)良好的污染物降解能力，对典型有机污染物亚甲基蓝(MB)和罗丹明B(RhB)的去除率分别达到91.5%和86.3%(180 min)，并保持稳定的循环重复性；(5)出色的环境稳定性，在高盐(质量分数25% NaCl)环境中持续光照8 h无明显盐分析出，在强酸、含油、表面活性剂和挥发性有机污染物等复杂水环境中保持稳定的光热蒸发性能，聚丙烯酰胺基石墨烯/Ag NPs复合水凝胶对大肠杆菌24 h有效抑菌率大于99%，实现210 d有效防霉；(6)广谱净化能力，对微塑料、农药(2,4-D)和模拟放射性核素等新兴污染物同样具有显著去除效果；(7)低成本、低含量(1 mg/g)的GO和纳米材料在实现优异性能的同时大大控制生产成本，如聚丙烯酰胺基石墨烯/Ag NPs复合水凝胶的成本低至47 元/m²(基于1 cm水凝胶厚度计算)。

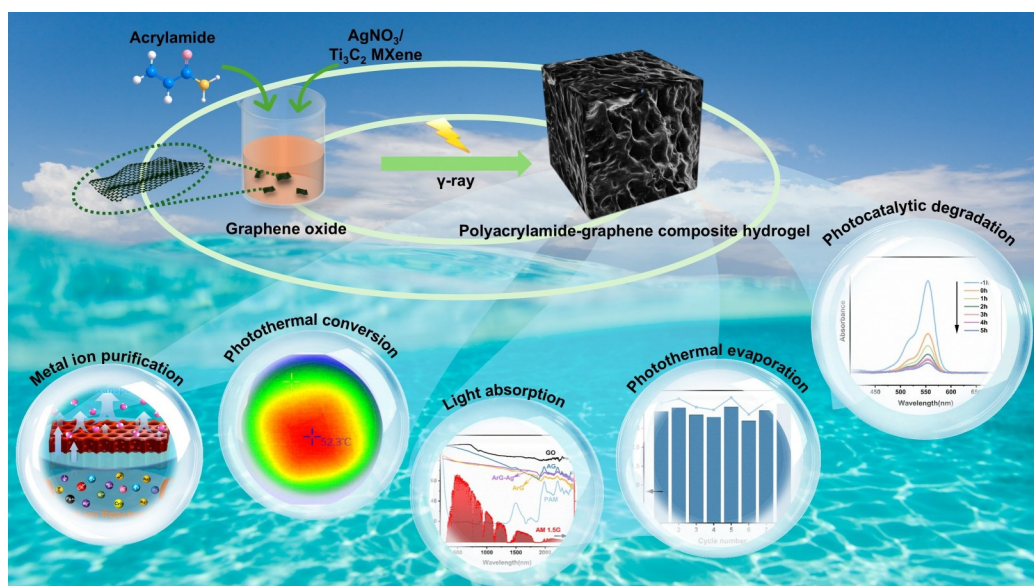


图2 辐射制备的多功能聚丙烯酰胺基石墨烯复合水凝胶的性能应用图

Fig.2 Performance and application of multifunctional polyacrylamide-based graphene composite hydrogel prepared by irradiation

总之，本研究通过绿色、简便的 γ 射线辐照技术，将功能性光热-催化协同纳米材料Ag NPs和

Ti₃C₂ MXene引入丙烯酰胺/石墨烯混合溶液中，一步得到多功能聚丙烯酰胺基石墨烯/纳米材料复合

水凝胶。这种多功能复合水凝胶材料具有耐盐、防污、长期稳定和成本低等特点，能够利用三维贯通多孔结构、高亲水性和优异的光热-光催化协同效应，实现高效太阳能蒸汽生成与有机污染物的同步降解，产出符合饮用水标准的淡水。与透光的亚克力板材和产水收集装置结合，形成太阳能驱动的小型一体化设备，无需外部能源，即可处理生活污水并实现水资源回收。这为辐射高分子材料在海水淡化和复杂水环境的综合治理上提供了创新性解决方案，有望改善太阳能资源丰富但干燥的偏远贫苦地区的缺水问题。

作者贡献声明 第一作者林琳负责研究设计、资料收集及分析、撰写论文；第二作者李林繁负责论文修改；通信作者李吉豪负责研究指导、论文修改。所有作者均已阅读并同意最终文本。

参考文献

- Wang P F, Xu J X, Bai Z Y, *et al.* Designing next-generation all-weather and efficient atmospheric water harvesting powered by solar energy[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, **18**(14): 7005-7022. DOI: 10.1039/d5ee01454a.
- Croitoru A M, Niculescu A G, Bîrcă A C, *et al.* Nanostructured aerogels for water decontamination: advances, challenges, and future perspectives[J]. *Nanomaterials*, 2025, **15**(12): 901. DOI: 10.3390/nano15120901.
- Fang Y M, Gao H M, Cheng K T, *et al.* An overview of photothermal materials for solar-driven interfacial evaporation[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2025, **36**(3): 109925. DOI: 10.1016/j.cclet.2024.109925.
- Chen C, Wang B Y, Xu J J, *et al.* Recent advancement in emerging MXene-based photocatalytic membrane for revolutionizing wastewater treatment[J]. *Small*, 2024, **20**(37): 2311427. DOI: 10.1002/sml.202311427.
- 韩斐, 汪文睿, 李聃屹, 等. 银纳米团簇复合材料的辐射法制备及性能研究[J]. *核技术*, 2023, **46**(5): 050202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050202. HAN Fei, WANG Wenrui, LI Danyi, *et al.* Preparation and properties of Ag nanocluster composites by radiation method[J]. *Nuclear Techniques*, 2023, **46**(5): 050202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050202.
- 胡杨, 魏旭炎, 李久强, 等. MXene/氧化石墨烯复合气凝胶的辐射制备及其超级电容器性能[J]. *辐射研究与*
- 辐射工艺学报, 2024, **42**(6): 060203. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0087.
- HU Yang, WEI Xuyan, LI Jiuqiang, *et al.* Radiation preparation of MXene/graphene oxide composite aerogel for supercapacitor[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2024, **42**(6): 060203. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0087.
- 翁汉钦, 张宝莹, 王璇, 等. 辐射活性接枝聚合制备双重响应性还原氧化石墨烯材料[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2024, **42**(6): 060204. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0101.
- WENG Hanqin, ZHANG Baoying, WANG Xuan, *et al.* Dual-responsive reduced graphene oxides prepared by radiation-initiated living radical grafting polymerization [J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2024, **42**(6): 060204. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0101.
- He Y L, Li J H, Li L F, *et al.* Gamma-ray irradiation-induced reduction and self-assembly of graphene oxide into three-dimensional graphene aerogel[J]. *Materials Letters*, 2016, **177**: 76-79. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.04.187.
- Li D Y, Lin L, Lu M L, *et al.* Magnetic graphene noble metal aerogels: preparation and application for catalytic degradation of 4-NP[J]. *New Journal of Chemistry*, 2023, **47**(22): 10751-10758. DOI: 10.1039/d3nj01041d.
- Sun Y, Wang W R, Li D Y, *et al.* Superhydrophobic melamine sponge prepared by radiation-induced grafting technology for efficient oil-water separation[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, **35**(9): 147. DOI: 10.1007/s41365-024-01507-0.
- 鲁曼丽, 李吉豪, 李林繁, 等. γ 射线辐照合成石墨烯/银复合多孔气凝胶及其对硝基苯酚的催化性能[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2020, **38**(2): 020201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.020201.
- LU Manli, LI Jihao, LI Linfan, *et al.* Synthesis of graphene/silver aerogel composites via gamma ray irradiation and its catalytic ability for 4-nitrophenol[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2020, **38**(2): 020201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.020201.
- Li D Y, Lin L, Xu S Y, *et al.* Multifunctional carbon nanotubes based hydrogel integrates photothermal water desalination, photothermal power generation, sensing, and flame retardancy, with a multi purpose and adjustable thermoelectric effect[J]. *Journal of Colloid and Interface*

Science, 2025, **690**: 137344. DOI: 10.1016/j.jcis. 2025. 137344.

- 13 Lin L, Li D Y, Xu S Y, *et al.* rGO/Ti3C2 MXene synergistic spontaneous realization of efficient clean water production and pollutant degradation[J]. Desalination, 2025, **603**: 118657. DOI: 10.1016/j. desal. 2025.118657.
- 14 Lin L, Wang W R, Li D Y, *et al.* Multifunctional graphene/Ag hydrogel with antimicrobial and catalytic properties for efficient solar-driven desalination and wastewater purification[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **478**: 147249. DOI: 10.1016/j. cej. 2023. 147249.



第一作者: 林琳, 女, 1999年出生, 2021年6月于绍兴大学获学士学位, 目前为中国科学院上海应用物理研究所博士研究生, 主要研究方向为辐射技术制备多功能石墨烯复合材料, E-mail: linlin@sinap.ac.cn

First author: LIN Lin (female) was born in 1999, obtained

a bachelor's degree from Shaoxing University in June 2021, and currently she is a doctoral student at the Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences. Her primary research focus is on the use of irradiation technology to prepare multifunctional graphene composite materials, E-mail: linlin@sinap.ac.cn



通信作者: 李吉豪, 男, 1986年出生, 2014年于中国科学院大学获博士学位, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事高分子辐射化学和石墨烯材料功能化研究, E-mail: lijihao@sinap.ac.cn

Corresponding author: LI Jihao (male) was born in 1986, obtained his doctoral degree from the University of Chinese Academy of Sciences in 2014, associate researcher, master's supervisor, mainly engaged in research on polymer irradiation chemistry and functionalization of graphene materials, E-mail: lijihao@sinap.ac.cn