

基于g-C₃N₄的复合材料在压电光催化领域的研究进展

梁语嫣, 董坤范, 邓梓瑜, 贾静茹, 周峻安, 傅仰河*

浙江师范大学含氟新材料研究所, 先进催化材料教育部重点实验室, 浙江 金华

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月9日

摘要

压电光催化是一种通过耦合半导体材料的光激发特性和压电材料的机械能响应的新兴协同催化技术, 有效解决传统光催化中光生载流子快速复合的关键问题。石墨相氮化碳(g-C₃N₄)因其独特的非中心对称层状结构(具本征压电性)、可见光响应、适宜能带结构及高稳定性等优势, 成为构建高性能压电光催化复合材料的理想基底。本文系统综述了近年来基于g-C₃N₄的复合材料在压电光催化领域的主要进展, 重点阐述材料的设计策略、性能增强机理及应用。

关键词

压电光催化, g-C₃N₄复合材料

Research Progress of g-C₃N₄-Based Composite Materials in the Field of Piezoelectric Photocatalysis

Yuyan Liang, Kunfan Dong, Ziyu Deng, Jingru Jia, Junan Zhou, Yanghe Fu*

Key Laboratory of the Ministry of Education for Advanced Catalysis Materials, Institute of Advanced Fluorine-Containing Materials, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: February 2, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 9, 2026

Abstract

Piezoelectric photocatalysis is an emerging synergistic catalytic technology that addresses the critical

*通讯作者。

文章引用: 梁语嫣, 董坤范, 邓梓瑜, 贾静茹, 周峻安, 傅仰河. 基于g-C₃N₄的复合材料在压电光催化领域的研究进展[J]. 材料科学, 2026, 16(3): 35-42. DOI: 10.12677/ms.2026.163049

issue of rapid recombination of photogenerated carriers in traditional photocatalysis by coupling the photoexcitation properties of semiconductor materials with the mechanical energy response of piezoelectric materials. Graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$), with its unique non-centrosymmetric layered structure (endowing it with intrinsic piezoelectricity), visible-light responsiveness, suitable band structure, and high stability, serves as an ideal substrate for constructing high-performance piezoelectric photocatalytic composites. This paper systematically reviews recent advances in $g\text{-C}_3\text{N}_4$ -based composite materials in the field of piezoelectric photocatalysis, with a focus on design strategies, performance enhancement mechanisms, and applications.

Keywords

Piezoelectric Photocatalysis, $g\text{-C}_3\text{N}_4$ -Based Composites

Copyright © 2026 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

在全球能源危机与环境污染日益严峻的背景下, 开发能协同利用多种可再生能源的绿色技术至关重要[1]。光催化技术可将太阳能转化为化学能, 用于能源生产和环境治理, 但其应用受限于光生载流子易复合、太阳能利用率低等瓶颈[2][3]。为此, 压电光催化作为一种新兴协同催化技术, 耦合半导体的光激发与压电材料的机械响应: 在光照与机械振动(如超声、水流)共同作用下, 压电材料内部产生的压电极化电场能有效驱动光生载流子定向分离, 从而大幅提升电荷分离效率与界面反应动力学, 实现了多能量收集与利用, 显著提升催化性能[4]-[6]。

在众多材料中, 石墨相氮化碳($g\text{-C}_3\text{N}_4$)因其独特的非中心对称层状结构(具本征压电性)、良好的可见光响应、适宜的能带结构及高稳定性等优势, 成为构建压电光催化复合材料的理想基底[7]-[10]。近年来, 通过元素掺杂、形貌调控、异质结构建等手段对 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 进行改性, 并与 BaTiO_3 、 ZnO 等压电材料或 MXene 等导电材料复合已成为研究热点[11]-[14]。这些复合材料在压电-光催化协同效应下, 于污染物降解、 H_2O_2 合成、 CO_2 还原等领域取得显著进展[9][10][15]。因此, 本文旨在系统综述基于 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的压电光催化复合材料的最新研究进展, 重点聚焦于其材料设计策略, 与在环境修复及能源转化等领域的应用, 为该领域的研究提供最新进展。

2. $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 基复合材料的设计策略

石墨相氮化碳($g\text{-C}_3\text{N}_4$)具有独特的二维类石墨层状结构, 其基本单元为三- s -三嗪环, 层间通过范德华力结合。这种结构赋予其高比表面积和丰富的活性位点。 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的带隙约为 2.7 eV, 可被可见光($\sim 475\text{ nm}$)激发, 且其表面可吸附多种官能团(如氨基、羟基), 易于修饰以调控表面性质和反应活性[10]。该材料可通过热缩聚、溶剂热法等多种方法合成, 并能通过调控层间距、带隙等参数优化性能[16]。然而, 单一半导体 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 存在光生载流子复合快、量子效率低等局限。为此, 研究者发展了缺陷工程、元素掺杂、结构调控及构建异质结等策略, 旨在提升其催化性能, 使其成为应对能源与环境挑战的有力候选材料。

2.1. 维度与形貌调控

形貌调控法是调控 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 结构的常用策略之一。采用传统热聚合法合成的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 通常呈现块状形

貌, 其比表面积较低, 且催化活性中心数量有限。通过将 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 设计为球形、纳米片状或多孔结构, 可有效增加其比表面积, 暴露更多活性位点, 从而显著提升光催化性能。此外, 焙烧温度也是调控其最终形貌与孔结构的关键参数: 提高焙烧温度一般有助于增大孔径, 而孔径与比表面积之间通常呈现正相关关系, 进而影响光催化活性。如图 1 所示, Li 等人将天然 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (CNB) 在 520°C 连续剥离 6 h, 成功制备出宏观泡沫状多孔超薄 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 纳米片, 其具有丰富的微孔(1~2 nm)、中孔(2~50 nm)和大孔(50~100 nm), 比表面积为 $277.98\text{ m}^2/\text{g}$, 是块状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 比表面积的近 26 倍; 可见光下产氢速率达到 $57.20\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$, 是块体 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的 22.24 倍; 对罗丹明 B 污染物的光降解活性是块体的 68 倍[17]。Xiao 等人通过对 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 纳米片进行形貌工程(多孔超薄化)和表面功能化(氨基修饰)的协同设计, 实现高效消毒[18]。但形貌调控策略存在合成工艺复杂、量子尺寸效应导致的光吸收减弱以及纳米结构在反应过程中易发生团聚或坍塌等问题。

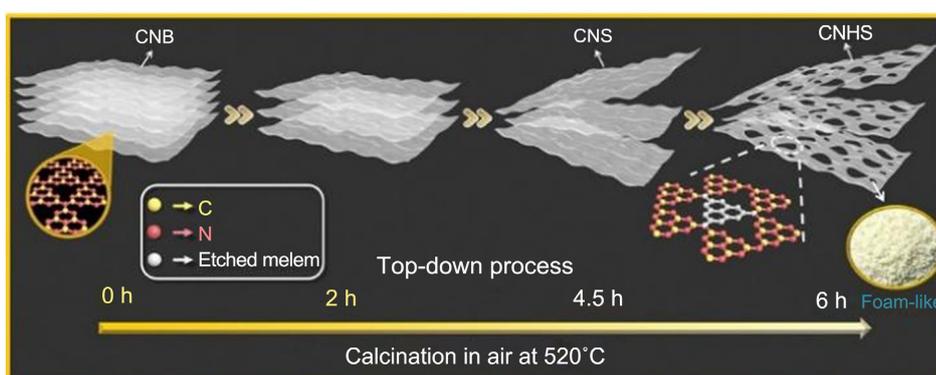


Figure 1. A top-down method involving thermal oxidation exfoliation and etching was employed to prepare porous ultrathin $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets

图 1. 自上向下法制备泡沫多孔超薄 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 纳米片

2.2. 缺陷工程

石墨相氮化碳($g\text{-C}_3\text{N}_4$)的缺陷工程主要聚焦于氮空位(N空位)与碳空位(C空位)的可控构筑。氮空位的引入可在其价带上方形成缺陷能级, 有效收窄材料带隙, 从而显著提升对可见光乃至近红外区域的光捕获能力。与之相对, 碳空位的构筑则倾向于在导带下方形成中间能级, 该能级可作为有效的电子捕获中心, 促进长波长光子的吸收与利用, 进一步拓宽材料的光响应范围。Gao 等人通过单一简易的合成策略, 同步实现了材料的超薄化、造孔和碳缺陷构筑, 提升 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的光催化性能(产氢速率达到 $10.14\text{ mmol h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, 是块体 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的 57 倍) [19]。Xue 等人制备了具有三配位氮空位(N_3C)的石墨相氮化碳($g\text{-C}_3\text{N}_4\text{-N}_3\text{C}$), 氮空位的引入能够有效窄化材料带隙、增强光吸收能力、促进光生电子-空穴对的分离与传输, 并提供丰富的表面活性位点。在光催化性能测试中, 最优样品 $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{-N}_3\text{C-0.3}$ 的光催化固氮速率和 H_2O_2 生成速率分别为 $1915\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1098\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ [20]。然而, 缺陷工程也存在局限性, 如不合理的缺陷易成为电荷复合中心、破坏材料稳定性, 且其精准调控与重现性难以保证等。

2.3. 元素掺杂

针对 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的元素掺杂策略, 当前研究主要围绕非金属掺杂、金属掺杂以及多元共掺杂等方向展开, 旨在系统调控其电子结构、拓宽光谱响应范围并提升表面催化活性。其中, 金属掺杂策略通过引入过渡金属或稀土金属等异质原子, 不仅能够构建高活性位点, 还可有效调节材料的能带结构与电荷分布, 从而强化光生载流子的分离与界面反应动力学, 为增强 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 在光催化过程中的性能提供了重要途径。Li

等人提出了过渡金属双锚定掺杂策略, 通过硫原子在 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 骨架中引入不对称扭曲结构, 形成了多重活性中心, 显著增强了材料的电子传输效率与催化位点可及性[21]。

非金属掺杂则可调节带隙、拓宽光吸收范围并促进电荷传输, 同时在半导体结构中引入缺陷, 改变其结晶特性与光吸收行为, 并为载流子捕获或复合提供位点。Mottammal 等人的研究进一步证实, 硫钾共掺杂及单一硫掺杂均能显著降低 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 带隙至 2.1 eV, 使其吸收边红移约 50 nm, 并在 420 nm 光照下实现 15.7% 的表观量子效率, 为未掺杂样品的 12 倍[22]。此外, Fahim A. Qaraah 等人通过水热-煅烧法成功制备了负载 Ag-Ni 双金属中心的六方多孔 $g\text{-C}_3\text{N}_4$, 其高比表面积、丰富的孔隙结构及双金属中心的协同作用显著提升了光催化性能, 优化条件下 CO 与 CH_4 的产率分别达到 $77.65 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $17.89 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ [23]。但元素掺杂面临掺杂位点设计不当引发电荷复合、引入外来原子削弱热稳定性, 以及金属掺杂剂在液相反应中易流失等风险。

2.4. 构建异质结

异质结结构因能显著提升材料性能而备受关注。如图 2 所示, 常见的异质结类型包括跨隙型(I 型)、交错隙型(II 型)和断隙型(III型) [24]。其中, 基于 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的异质结被广泛用于增强光生载流子的分离效率并拓宽可见光吸收范围, 从而有效提升光催化活性。例如, Mishra 等人通过超声-煅烧法制备了 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{NiTiO}_3/\text{NiSnO}_3$ 双 S 型异质结, 该体系构建了双向电荷转移通道, 在可见光下产氢速率达到 $137 \text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 较单一组分提升约 5.5 倍[25]。

从能带结构来看, I 型异质结中光生电子-空穴对易聚集于同一半导体, 不利于载流子分离; III 型异质结因能带交错而无重叠, 载流子难以跨界面迁移; 而 II 型异质结凭借其交错的价带与导带位置, 可实现光生电子与空穴的空间分离, 因而成为提升光催化效率的有效策略。近年来, 基于 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的 II 型异质结研究日益增多, 如 Wang 等人报道的 $\text{TiO}_2@g\text{-C}_3\text{N}_4$ 核壳量子异质结, 该结构促进了两相间的电子转移, 使四环素降解活性较纯 TiO_2 和 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 分别提高 2 倍和 2.3 倍[26]。这些进展表明, 合理设计 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 基异质结是提高光催化性能的重要途径。在异质结的宏观调控基础上, 深入理解微观尺度下的应力调控机制, 能够为材料设计提供新的维度。

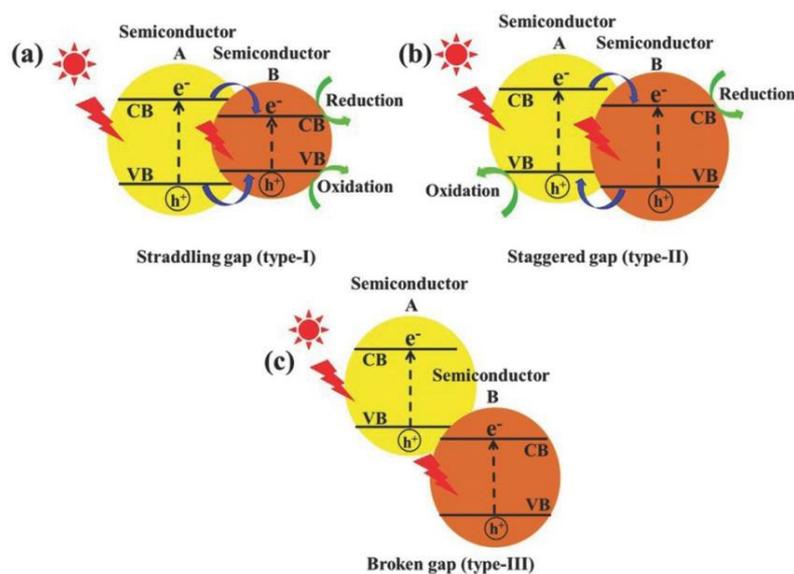


Figure 2. Schematic diagrams of three common types of heterojunctions: (a) Type I; (b) Type II; and (c) Type III heterojunction
图 2. 三种常见异质结示意图: (a) I 型异质结 (b) II 型异质结 (c) III 型异质结

3. g-C₃N₄ 基复合材料在压电光催化中的应用

压电光催化作为新兴的耦合催化策略，通过协同光激励与机械应力诱导的压电效应，为解决光生载流子快速复合这一关键挑战提供了创新路径。g-C₃N₄ 及其复合材料凭借其可调控的能带结构和非中心对称特性，成为构建高效压电光催化体系的理想平台。在光-力协同作用下，该系统表现出三方面核心增强机制：首先，压电极化电场作为动态内建电场，定向驱动光生电子与空穴反向迁移，显著抑制复合；其次，压电势调制表面能带弯曲与电荷分布，促进反应物分子的定向吸附与活化；此外，强电场效应还可拓宽材料的光响应范围。这些协同作用使催化效率显著超越单一光催化或压电催化，被应用于环境修复及能源转化等领域。

3.1. 有机污染物的高效降解

有机污染物的高效降解是压电光催化技术应用最成熟、研究最广泛的领域。g-C₃N₄ 基压电光催化系统通过光-压电协同效应，显著增强了以羟基自由基(\bullet OH)、超氧自由基(\bullet O₂⁻)、单线态氧(¹O₂)及空穴(h⁺)为主导的高级氧化过程，实现了对染料、抗生素及新兴污染物的快速矿化。例如，Khadim 等人构建了 AgBr/掺溴 g-C₃N₄(AgBr/Br-g-C₃N₄)Z 型异质结，在可见光与超声协同作用下，该催化剂对亚甲基蓝(MB)的降解率在 60 分钟内可达 99.7%，展现出优异的压电光催化性能[27]。表 1 总结了部分不同 g-C₃N₄ 基材料在污染物降解中的表现。

3.2. 产氢和产过氧化氢

g-C₃N₄ 基材料的压电光催化在制氢方面表现出显著的效果。Cui 等人通过冷冻相转化策略制备的三维多孔 g-C₃N₄/LiNbO₃/PVDF 压电光催化膜，用于高效光催化产氢，该膜独特的 3D 多孔结构与流体诱导的压电场协同作用，显著提升了光生载流子分离效率。实验表明，该膜在可见光下的产氢速率达 136.02 $\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$ [32]。

g-C₃N₄ 基材料不仅可以压电光催化制氢，在过氧化氢合成方面也具有巨大的应用潜力。Meng 等人构建了 ZIF-L/g-C₃N₄Z 型压电光催化异质结，用于高效双通道产 H₂O₂。该体系通过匹配的 Z 型能带结构与压电场协同作用，促进光生载流子的定向迁移，将 H₂O₂ 生成路径从单通道拓展为双通道。最优样品 ZC50 在无牺牲剂条件下产 H₂O₂ 速率达 1.45 mmol·g⁻¹·h⁻¹，显著优于单一组分[33]。Wang 等人通过分子工程精确调控石墨相氮化碳(g-C₃N₄)的结构，研究了压电效应对光催化产 H₂O₂ 的影响机制。研究表明，对于磷修饰(CN-P)和氧功能化(CN-OF)的样品，压电效应可将其活性分别提升 1.46 和 1.51 倍[34]。

Table 1. Performance of different g-C₃N₄-based materials in pollutant degradation

表 1. 不同 g-C₃N₄ 基材料在污染物降解中的表现

序号	催化剂	降解污染物	降解效率	压电光协同条件	参考文献
1	AgBr/Br 掺杂 g-C ₃ N ₄ 异质结	亚甲基蓝(MB)	60 min 内降解率达 99.7%	可见光、超声波、气升式反应器	[28]
2	Fe 掺杂 g-C ₃ N ₄ (FeCN)	亚甲基蓝(MB)	60 min 降解率为 97.7%	可见光、超声波	[29]
3	多孔管状 g-C ₃ N ₄ (PTCN)	四环素(TC)	在 30 min 内的降解率为 89%	可见光、超声波	[13]
4	g-C ₃ N ₄ /PdI-g-C ₃ N ₄ 同质结	阿替特拉津(ATZ)	60 min 后降解率可达 94%	磁力搅拌，可见光	[30]
5	N-空位 g-C ₃ N ₄ /BaTiO ₃ (CNVB)	一氧化氮(NO)	去除率可达 77.9%	可见光、超声波	[31]

4. 总结

综上所述, 石墨相氮化碳(g-C₃N₄)基材料凭借独特的类石墨共轭结构、可调光电性能及环境友好特性, 已成为压电光催化领域的核心研究体系, 在能源转化与环境修复领域展现出广阔应用前景。本文系统综述了该类材料的设计策略与应用进展, 通过形貌调控、缺陷工程、元素掺杂及异质结构建等关键手段, 可有效优化材料比表面积、调控电子能带结构, 显著提升光生载流子分离效率与催化活性。在环境修复场景中, g-C₃N₄ 基压电光催化剂借助光-力协同作用强化高级氧化过程, 实现对各类有机污染物的高效降解; 在能源转化领域, 其在光催化制氢、过氧化氢合成等反应中表现出优异的催化性能, 为清洁能源生产提供了新路径。

然而, 该技术从实验室研究迈向工程化应用仍面临多重关键挑战: 一方面, 复杂水质环境中光-压电机理尚未完全阐明, 实际废水中共存物质易干扰催化反应, 污染物降解路径与毒性产物的系统评估也显不足; 另一方面, 超声激励产生的空化热、黏滞热易与纯压电效应耦合, 既可能导致热致催化增益被误判为压电效应贡献, 也可能因高温削弱极化电场、加剧载流子复合; 同时, 催化剂长期承受机械冲击与剪切力时, 易发生晶格微裂纹等压电性能疲劳, 以及颗粒破碎团聚、多孔结构坍塌等宏观结构破坏导致失效等问题。为推动技术实用化发展, 未来研究应聚焦机理深化、材料创新、工程优化及环境评估四大方向, 开发原位动态表征技术与高稳定性催化材料, 建立统一的性能评价标准, 开展工程化放大研究, 实现热效应、压电效应与光催化效应的精准调控, 推动 g-C₃N₄ 基压电光催化技术向高效、稳定、可持续的产业化方向迈进。

参考文献

- [1] Liu, Q., Zhao, Y., Wang, J., Zhou, Y., Liu, X., Hao, M., *et al.* (2023) Application of Single-Atom-Based Photocatalysts in Environmental Pollutant Removal and Renewable Energy Production. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **54**, 909-930. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2284646>
- [2] Yu, C., Tan, M., Tao, C., Hou, Y., Liu, C., Meng, H., *et al.* (2022) Remarkably Enhanced Piezo-Photocatalytic Performance in BaTiO₃/CuO Heterostructures for Organic Pollutant Degradation. *Journal of Advanced Ceramics*, **11**, 414-426. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0544-4>
- [3] Loeb, S.K., Alvarez, P.J.J., Brame, J.A., Cates, E.L., Choi, W., Crittenden, J., *et al.* (2018) The Technology Horizon for Photocatalytic Water Treatment: Sunrise or Sunset? *Environmental Science & Technology*, **53**, 2937-2947. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05041>
- [4] Tu, S., Guo, Y., Zhang, Y., Hu, C., Zhang, T., Ma, T., *et al.* (2020) Piezocatalysis and Piezo-Photocatalysis: Catalysts Classification and Modification Strategy, Reaction Mechanism, and Practical Application. *Advanced Functional Materials*, **30**, Article 2005158. <https://doi.org/10.1002/adfm.202005158>
- [5] Kumar, D., Sharma, S. and Khare, N. (2021) Piezo-phototronic and Plasmonic Effect Coupled Ag-NaNbO₃ Nanocomposite for Enhanced Photocatalytic and Photoelectrochemical Water Splitting Activity. *Renewable Energy*, **163**, 1569-1579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.132>
- [6] Wang, Z., Hu, T., He, H., Fu, Y., Zhang, X., Sun, J., *et al.* (2018) Enhanced H₂ Production of TiO₂/ZnO Nanowires Co-Using Solar and Mechanical Energy through Piezo-Photocatalytic Effect. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **6**, 10162-10172. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01480>
- [7] Lei, H., Wu, M., Mo, F., Ji, S., Dong, X., Jia, Y., *et al.* (2021) Efficiently Harvesting the Ultrasonic Vibration Energy of Two-Dimensional Graphitic Carbon Nitride for Piezocatalytic Degradation of Dichlorophenols. *Environmental Science: Nano*, **8**, 1398-1407. <https://doi.org/10.1039/d0en01028f>
- [8] Chen, Z., Yu, X., Zhu, Q., Fan, T., Wu, Q., Zhang, L., *et al.* (2018) Steam Engraving Optimization of Graphitic Carbon Nitride with Enhanced Photocatalytic Hydrogen Evolution. *Carbon*, **139**, 189-194. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.06.051>
- [9] Feng, Q., Liu, Z., Su, R., Chen, Y., Wang, Y., Ma, D., *et al.* (2025) Revealing the Reaction Mechanism of the Novel P-N Heterojunction Mn₃O₄-C₃N₄ in Efficient Activation of Chlorite to Degrade Organic Pollutants under Piezoelectric Catalysis. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, **362**, Article 124714. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.124714>
- [10] Zhu, W., Yue, Y., Wang, H., Zhang, B., Hou, R., Xiao, J., *et al.* (2023) Recent Advances on Energy and Environmental

- Application of Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄)-Based Photocatalysts: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **11**, Article 110164. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110164>
- [11] Xie, M., Tang, J., Kong, L., Lu, W., Natarajan, V., Zhu, F., *et al.* (2019) Cobalt Doped g-C₃N₄ Activation of Peroxymonosulfate for Monochlorophenols Degradation. *Chemical Engineering Journal*, **360**, 1213-1222. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.130>
- [12] Kang, Z., Ke, K., Lin, E., Qin, N., Wu, J., Huang, R., *et al.* (2022) Piezoelectric Polarization Modulated Novel Bi₂WO₆/g-C₃N₄/ZnO Z-Scheme Heterojunctions with G-C₃N₄ Intermediate Layer for Efficient Piezo-Photocatalytic Decomposition of Harmful Organic Pollutants. *Journal of Colloid and Interface Science*, **607**, 1589-1602. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.09.007>
- [13] Gong, S., Zhang, W., Liang, Z., Zhang, Y., Gan, T., Hu, H., *et al.* (2023) Construction of a BaTiO₃/Tubular g-C₃N₄ Dual Piezoelectric Photocatalyst with Enhanced Carrier Separation for Efficient Degradation of Tetracycline. *Chemical Engineering Journal*, **461**, Article 141947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141947>
- [14] Su, T., Hood, Z.D., Naguib, M., Bai, L., Luo, S., Rouleau, C.M., *et al.* (2019) 2D/2D Heterojunction of Ti₃C₂/g-C₃N₄ Nanosheets for Enhanced Photocatalytic Hydrogen Evolution. *Nanoscale*, **11**, 8138-8149. <https://doi.org/10.1039/c9nr00168a>
- [15] Zhao, Z., Chen, R., Ling, Q., Yan, K., Gan, W., Lu, Y., *et al.* (2025) Enhanced H₂O₂ Production via Piezo-Photocatalysis Using BaTiO₃/g-C₃N₄ S-Scheme Heterojunction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article 115575. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115575>
- [16] Zhao, B., Zhong, W., Chen, F., Wang, P., Bie, C. and Yu, H. (2023) High-Crystalline G-C₃N₄ Photocatalysts: Synthesis, Structure Modulation, and H₂-Evolution Application. *Chinese Journal of Catalysis*, **52**, 127-143. [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(23\)64491-2](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(23)64491-2)
- [17] Li, Y., Jin, R., Xing, Y., Li, J., Song, S., Liu, X., *et al.* (2016) Macroscopic Foam-Like Holey Ultrathin g-C₃N₄ Nanosheets for Drastic Improvement of Visible-Light Photocatalytic Activity. *Advanced Energy Materials*, **6**, Article 1601273. <https://doi.org/10.1002/aenm.201601273>
- [18] Xiao, J., Liu, Q., Song, M., Li, X., Li, Q. and Shang, J.K. (2021) Directing Photocatalytic Pathway to Exceedingly High Antibacterial Activity in Water by Functionalizing Holey Ultrathin Nanosheets of Graphitic Carbon Nitride. *Water Research*, **198**, Article 117125. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117125>
- [19] Gao, S., Wang, X., Song, C., Zhou, S., Yang, F. and Kong, Y. (2021) Engineering Carbon-Defects on Ultrathin g-C₃N₄ Allows One-Pot Output and Dramatically Boosts Photoredox Catalytic Activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, **295**, Article 120272. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120272>
- [20] Xue, Y., Ma, C., Yang, Q., Wang, X., An, S., Zhang, X., *et al.* (2023) Construction of g-C₃N₄ with Three Coordinated Nitrogen (N₃C) Vacancies for Excellent Photocatalytic Activities of N₂ Fixation and H₂O₂ Production. *Chemical Engineering Journal*, **457**, Article 141146. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141146>
- [21] Li, W., Zeng, H., Zhou, Z., Li, L., Tang, R., Ding, C., *et al.* (2025) Sulfur-Synergized Dual-Cobalt Anchoring Configuration in Carbon Nitride: Deciphering Cooperative Mechanisms for Boosted Peroxymonosulfate Activation. *Chemical Engineering Journal*, **520**, Article 166214. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.166214>
- [22] Mottammal, D., Cherusseri, J., Thomas, S.A., Isaac R.S., R., Rajendran, D.N. and Choi, M.Y. (2025) Toward Doping in Graphitic Carbon Nitride: Progress and Perspectives on Catalytic Hydrogen Production. *Advanced Materials Technologies*, **10**, e00667. <https://doi.org/10.1002/admt.202500667>
- [23] Qaraah, F.A., Mahyoub, S.A., Shen, H., Yin, X., Salah, A., Onaizi, S.A., *et al.* (2025) Synergistic Role of Dual-Metal Sites (Ag-Ni) in Hexagonal Porous g-C₃N₄ Nanostructures for Enhanced Photocatalytic CO₂ Reduction. *Carbon*, **232**, Article 119735. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119735>
- [24] Low, J., Yu, J., Jaroniec, M., Wageh, S. and Al-Ghamdi, A.A. (2017) Heterojunction Photocatalysts. *Advanced Materials*, **29**, Article 1601694. <https://doi.org/10.1002/adma.201601694>
- [25] Mishra, S., Kumar, A. and Verma, N. (2025) G-C₃N₄-Supported Niobate (B = Ti, Sn) Perovskite-Based Arrow-Up Dual-Scheme Heterostructure for Efficient Hydrogen Production via Water Splitting. *Fuel*, **399**, Article 135673. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135673>
- [26] Wang, W., Fang, J., Shao, S., Lai, M. and Lu, C. (2017) Compact and Uniform TiO₂@g-C₃N₄ Core-Shell Quantum Heterojunction for Photocatalytic Degradation of Tetracycline Antibiotics. *Applied Catalysis B: Environmental*, **217**, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.037>
- [27] Khadim, H.J., Ammar, S.H., Al-Farraj, A., Mohammed, M.S., Jabbar, Z.H. and Alabdly, H.A. (2025) Fabrication of AgBr/Br-Doped g-C₃N₄ Hybrids for Efficient Piezo-Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants in Split-Plate Air-lift Reactor. *Journal of Water Process Engineering*, **76**, Article 108118. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108118>
- [28] Mohammed, M.S., Ammar, S.H., Kareem, Y.S. and Al-Farraj, A. (2025) Assembly of Fe-Doped g-C₃N₄ as a Robust Piezophotocatalyst System for Degradation of Organic Dyes. *Journal of Molecular Structure*, **1344**, Article 142962.

-
- <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142962>
- [29] Wu, T., Liu, Z., Shao, B., He, Q., Pan, Y., Zhang, X., *et al.* (2024) Enhanced Piezo-Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants by Cambered Wall Lamellar Structure of Porous Tubular g-C₃N₄. *Nano Energy*, **120**, Article 109137. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.109137>
- [30] Tang, R., Gong, D., Zhou, Y., Deng, Y., Feng, C., Xiong, S., *et al.* (2022) Unique g-C₃N₄/PDI-g-C₃N₄ Homojunction with Synergistic Piezo-Photocatalytic Effect for Aquatic Contaminant Control and H₂O₂ Generation under Visible Light. *Applied Catalysis B: Environmental*, **303**, Article 120929. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120929>
- [31] Liu, G., Zhao, T., Wu, J., Chang, M., Fei, H., Li, F., *et al.* (2025) Enhanced Removal and Selective Conversion for NO with N-Vacancies g-C₃N₄/BaTiO₃ by Piezo-Photocatalysis. *Separation and Purification Technology*, **360**, Article 130914. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130914>
- [32] Cui, Y., Wang, Z., Li, B., Yan, Y., Xu, R., Meng, M., *et al.* (2022) Fluid-Induced Piezoelectric Field Enhancing Photocatalytic Hydrogen Evolution Reaction on g-C₃N₄/liNbO₃/PVDF Membrane. *Nano Energy*, **99**, Article 107429. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107429>
- [33] Meng, L., Zhao, C., Zhang, X., Guo, R., Zheng, Y., Chu, H., *et al.* (2024) Piezo-Photocatalytic Synergetic for H₂O₂ Generation via Dual-Pathway over Z-Scheme ZIF-L/g-C₃N₄ Heterojunction. *Nano Energy*, **128**, Article 109795. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109795>
- [34] Wang, P., Fan, S., Li, X., Duan, J. and Zhang, D. (2023) Modulating the Molecular Structure of Graphitic Carbon Nitride for Identifying the Impact of the Piezoelectric Effect on Photocatalytic H₂O₂ Production. *ACS Catalysis*, **13**, 9515-9523. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c02565>