

技术进展

$g\text{-C}_3\text{N}_4$ 光催化还原 CO_2 的研究进展

张泽, 乔琳, 张怡愉, 袁鹏飞, 付东*

(华北电力大学(保定)环境科学与工程系, 河北保定 071003)

摘要: 综述了光催化还原 CO_2 的基本原理与 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的基本结构与制备方法, 重点探讨了通过形貌调控、元素掺杂、助催化剂负载和构建异质结结构等策略对 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 进行改性的方法, 对 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 基催化剂光催化还原 CO_2 的发展前景和未来挑战进行了展望。

关键词: 石墨相氮化碳; 光催化还原 CO_2 ; 改性策略

中图分类号: O643

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0017-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.004

Research progress on $g\text{-C}_3\text{N}_4$ photocatalytic reduction of CO_2

ZHANG Ze, QIAO Lin, ZHANG Yi-yu, YUAN Peng-fei, FU Dong*

(Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: This review summarizes the fundamental principles of photocatalytic CO_2 reduction and the basic structure and preparation methods of $g\text{-C}_3\text{N}_4$. It focuses on discussing strategies for modifying $g\text{-C}_3\text{N}_4$ through morphology control, elemental doping, co-catalyst loading, and heterojunction structure construction. Finally, it provides an outlook on the development prospects and future challenges for $g\text{-C}_3\text{N}_4$ -based catalysts in photocatalytic CO_2 reduction.

Key words: graphitic phase carbon nitride; photocatalytic CO_2 reduction; modification strategies

随着工业和科学技术的不断发展, 大气中的 CO_2 浓度不断增加, 全球变暖已严重影响到了人类的生产力。因此, 控制 CO_2 的排放刻不容缓。近年来 CO_2 减排技术的开发发展迅速, 例如电催化还原、热催化还原、光催化还原和生物还原等技术都已日渐成熟^[1]。与其他技术相比, 光催化还原技术具有很大的优势, 具有稳定性好、对生态环境的影响较小与成本低等优点^[2]。大量专家学者针对光催化还原 CO_2 这一课题进行了广泛的研究, 探索和开发出了各种类型的光催化剂, 如 TiO_2 、 BiVO_4 、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 等。

在众多光催化材料中, $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 是一种很有潜力的半导体材料。 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 制作工艺简单、成本廉价、稳定性好、具有合适的带隙结构 (2.7 eV), 能满足光催化 CO_2 的热力学条件。然而, 由于 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的光吸收范围较窄、光生载流子快速重组、比表面积小以及电子传递效率较低等原因, 其活性受到抑制^[3]。为解决上述问题, 提高 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的光催化效率, 研究人员探索了许多改性方法, 如形貌调控、元素掺杂、助催化剂负载和构建异质结结构等。这些改性策略提升了 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 光催化性能, 使其在还原

CO_2 方面的前景更加广阔。

本文中首先简要介绍了光催化还原 CO_2 的基本原理以及 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的基本结构与制备方法; 然后分别从形貌调控、元素掺杂、助催化剂负载和构建异质结结构 4 个方面阐述了 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 基材料的改性策略; 最后创新性地对 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 基材料用于光催化 CO_2 的应用前景进行了展望。

1 光催化还原 CO_2 的基本原理

CO_2 ($G_0 = -394.4 \text{ kJ/mol}$) 是一种热力学稳定的线性分子, 电子结构非常稳定, 因此如果没有合适的催化剂和充足的能量, 很难将其转化为有价值的化学品^[4]。但此反应并非是不可能完成的, 当 CO_2 分子吸附到光催化剂的表面时, 线性结构会变得弯曲, 电子会更有利于转移到 CO_2 。因此, 选择合适的光催化材料会有效促进 CO_2 的还原反应。

光催化还原 CO_2 主要发生在水溶液体系中, 如图 1 所示, 半导体光催化还原 CO_2 主要涉及以下 6 个步骤。①光激发: 当光照射到光催化剂表面时, 光催化剂吸收光子能量以启动光活化过程。②电子-

收稿日期: 2025-10-28; 修回日期: 2026-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51776072)

作者简介: 张泽 (2000-), 男, 硕士生; 付东 (1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为烟气中 CO_2 化学捕集和超临界应用, 通讯联系人,

fudong@tsinghua.org.cn。

空穴对的产生:光激发后,在半导体 CB 和 VB 分别产生电子和空穴。③电子-空穴对的迁移:光生 e^- 和光生 h^+ 将迁移到光催化剂表面。④ CO_2 吸附: CO_2 分子吸附在光催化剂表面并捕捉表面的自由电子。⑤氧化还原反应:吸附在表面的 CO_2 分子与自由电子发生还原反应, CO_2 分子最终被还原成为 CO 、 CH_3OH 、 CH_4 、 H_2 等, H_2O 则通过氧化反应氧化为 O_2 和 H^+ 。⑥产物的解吸:当氧化还原反应完成后,产物将迅速从催化剂表面进行解吸,确保后续氧化还原反应的进行^[5]。

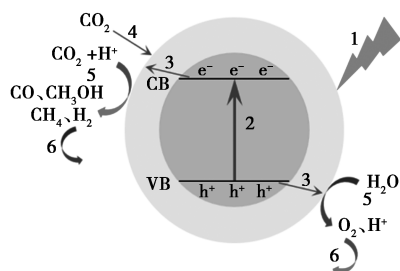


图 1 光催化还原 CO_2 的基本步骤

2 $g-C_3N_4$ 的基本结构与制备

据报道, $g-C_3N_4$ 通常有 7 种不同的结构相: $\alpha-C_3N_4$, 带隙为 5.5 eV; $\beta-C_3N_4$, 带隙为 4.85 eV; 立方- C_3N_4 , 带隙为 4.3 eV; 伪立方- C_3N_4 , 带隙为 4.13 eV; $g-h$ -三嗪, 带隙为 2.97 eV; $g-o$ -三嗪, 带隙为 0.93 eV; $g-h$ -庚嗪, 带隙为 2.88 eV^[6]。其中 g 相 ($g-C_3N_4$) 最为稳定, $g-C_3N_4$ 基主要由三嗪环 (C_3N_3) 如图 2(a) 和七嗪环 (C_6N_7) 如图 2(b) 的重复单元组成。与三嗪环结构相比, 七嗪环结构在能

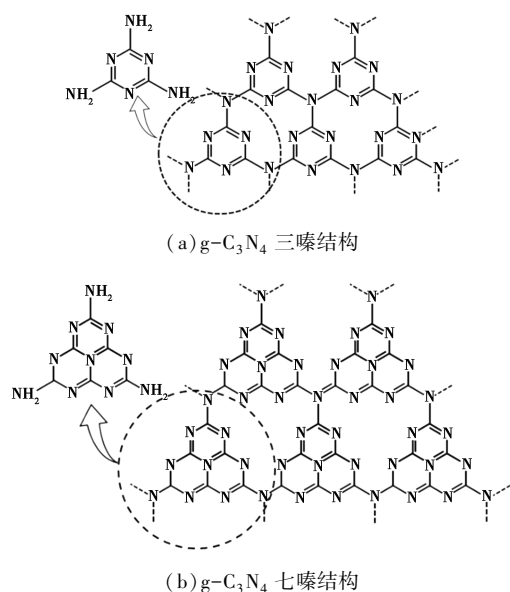


图 2 $g-C_3N_4$ 三嗪结构与 $g-C_3N_4$ 七嗪结构

量上更有优势且具有更加稳定的化学结构, 因此, 七嗪环通常被认为是 $g-C_3N_4$ 的典型结构。

目前, $g-C_3N_4$ 的主要制备方法包括 4 种^[7]: ①热聚合法通常采用前驱体在空气中煅烧制成, 与其他方法相比, 热聚合法具有操作简单、成本低、收益高等优点。②溶剂热法是在密闭的反应器中, 以特定的溶剂为反应介质, 通过加热使反应物在高温高压下生成 $g-C_3N_4$ 。③固相反应法通常通过固态原料在高温下直接发生热聚合与缩合反应, 该反应能耗较高。④超分子组装法利用分子间的非共价键形成特定结构的超分子聚集体, 再经过热聚合转化为稳定的 $g-C_3N_4$ 结构。该反应具有反应条件温和等优点。在上述合成方法中, 热聚合法是最为常用的 $g-C_3N_4$ 制备方法。

3 $g-C_3N_4$ 基材料的改性策略

$g-C_3N_4$ 呈块状堆叠结构, 导致暴露的反应活性位点较少, 且光生电子和空穴的快速重组以及可见光的有限吸收大大影响了其光催化性能。为改善以上情况, 研究者探索了各种改性手段。本章内容将从形貌调控、元素掺杂、助催化剂负载和构建异质结构 4 个方面对 $g-C_3N_4$ 基材料的改性策略进行详细阐述。

3.1 形貌调控

$g-C_3N_4$ 通常表现为片状堆叠形成的块状结构, 导致 $g-C_3N_4$ 的比表面积小, 催化活性位点少等问题。形貌调控可以通过促进光吸收、增加比表面积以暴露更多的反应活性位点和缩短电荷的转移途径从而提高光催化性能^[8]。目前, 人们已经成功合成了多种形态的 $g-C_3N_4$ 材料, 如零维(0D)纳米点、一维(1D)纳米管、二维(2D)纳米片、三维(3D)纳米球等。

Zhang 等^[9]通过水热反应将 CNQDs 与 Bi_2WO_6 进行结合, 成功制备了 CNQDs/ Bi_2WO_6 材料。如图 3(a) 所示, $g-C_3N_4$ 量子点(CNQDs)尺寸极小, 显著缩短了光生载流子的扩散距离。CNQDs 表现出独特的理化性质, 将长波长光转化为短波长光, 为光生电荷载流子的产生创造了有利条件。300 W 氙灯气氛下, CO 产率是纯 Bi_2WO_6 的 11 倍。此性能上的提升很大程度归因于 CNQDs 的引入, 提供了特殊的电子转移通道并提高了光利用率。因此, CNQDs 在光催化还原 CO_2 上具有显著的潜力, 成为光催化领域强力的选择。

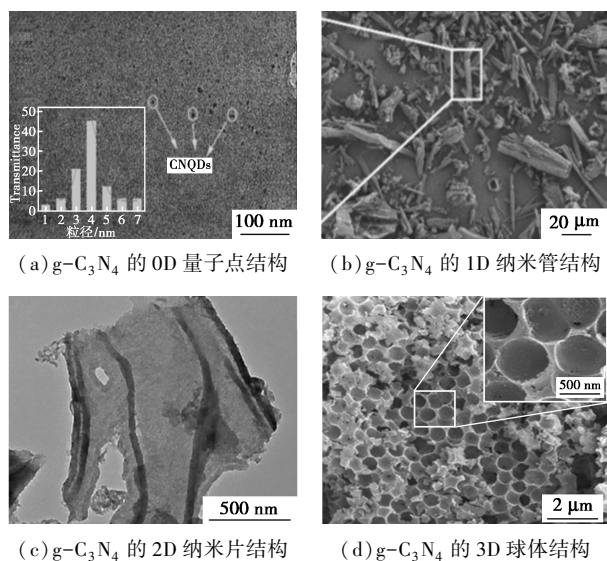


图3 形貌调控结构

$g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的一维(1D)结构与0D结构相比,载流子分离与传输更加高效,且结构稳定性与抗团聚性更好。如图3(b)所示,Zhou等^[10]以三聚氰胺和三聚氰酸为原料,采用超分子自组装法和光沉积法制备了大比表面积和肖特基结的 $\text{Ag/g-C}_3\text{N}_4$ 纳米管状材料。与原始 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 相比 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 纳米管具有更大的比表面积($93.44 \text{ m}^2/\text{g}$), CO 产率为 $34.72 \mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 生产选择性为 97.35%, 远远优于原始块状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的还原性能。

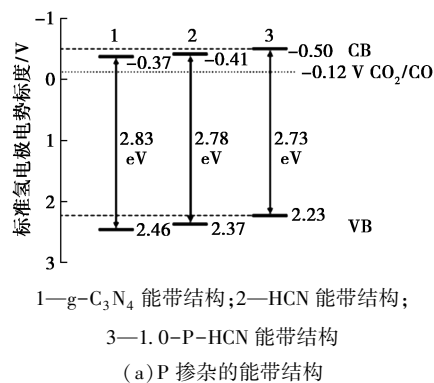
相比于 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 一维(1D)结构,二维结构(2D)有着明显不同,纳米片是最常见的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 2D 形态。Yang等^[11]采用逐步协同剥离法制备了高比表面积与高导带位置的超薄多孔 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (THCN)。此外,还用 HCl 辅助水热剥离和空气中的连续热剥离/蚀刻对其进行了处理。如图3(c)所示,经处理后, $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的厚度变得更薄,比表面积更大,与原始 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (BCN) 相比,THCN 的比表面积(BET)是 BCN 的 55 倍。THCN 由于独特的物理化学结构,表现出优异的降解性能并实现 CO_2 到 CO 和 CH_4 的高效转化率。

与上述讨论的形貌结构相比, $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 三维(3D)结构包括多孔结构、球体、泡沫状结构等。Fang等^[12]以 SiO_2 球体为硬模板制备了三维(3D)多孔构型 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 光催化剂(PCN),并进行镀金处理。如图3(d)所示,PCN 表面呈明显紧密的多孔结构,边缘紧密靠近。孔隙直径 585 nm,与可见光波长相似,因此更有利于捕获可见光从而提高光催化效率。 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 的还原效率分别为 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的 2.7、4.2、7.7 倍。

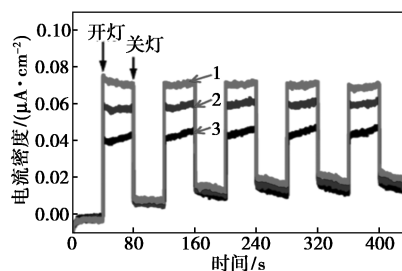
3.2 元素掺杂

元素掺杂被认为是改变半导体光学性质和电子结构的有效方法,在 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 上掺杂不同的杂原子可以调节能带结构,扩大光响应范围,促进电荷的传输,从而增强光催化性能。元素掺杂主要分为 2 大类:非金属元素和金属元素^[13]。

非金属元素掺杂主要有卤素(F、Cl、Br、I)、氧族元素(O、S、Se)、P 和 B 等。Alauddin等^[14]通过水热和剥离法制作了 Cl 掺杂的二维(2D) $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 纳米片(6-Cl/CN)。根据电化学测试得出,6-Cl/CN 的光电流响应为块状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的 4.4 倍,样品的平均辐射寿命比块状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 时间更长,Cl 掺杂增强了电导率,抑制了载流子复合,有效提高了光催化效率。Sun等^[15]以三聚氰胺为前驱体,在水热处理过程中以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 为磷源(P)合成了 P 掺杂的空心管状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (X-P-HCN)。其中,1.0-P-HCN 材料表现出最强的光吸收能力,如图4(a)所示,1.0-P-HCN 具有最窄的带隙,且导带位置更负,说明其具有更强的还原性。如图4(b)所示,1.0-P-HCN 表现出最高的光电流密度,表明 P 掺杂增强了光生电子-空穴对的分离,增强了光催化 CO_2 的还原性能。与原始块状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 相比 1.0-P-HCN 的 CO 产率为 $9.00 \mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$,是块状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的 10.22 倍。



1— $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 能带结构;2—HCN 能带结构;
3—1.0-P-HCN 能带结构
(a) P 掺杂的能带结构



1—1.0-P-HCN 瞬态光电流密度;2—HCN 瞬态光电流密度;
3— $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 瞬态光电流密度
(b) 瞬态光电流密度

图4 P 掺杂的能带结构与瞬态光电流密度

除了掺杂非金属原子外,金属原子也可被掺杂到 $g-C_3N_4$ 中。掺杂金属原子后,电子从金属转移到邻近的 C 或 N 原子,改变了 C 或 N 原子的电子密度,从而对 $g-C_3N_4$ 的电子及能带结构产生影响。Qi 等^[16]通过热聚合法成功制备了 Cu 掺杂的 $g-C_3N_4$ (Cu-PCN),通过原位 FT-IR 和 DFT 计算表明,改性后的 Cu 作为激活 CO_2 的新活性位点,介导电子通过 Cu 位点转移到被吸收的 CO_2 活性位点上。此外 Cu 的掺杂可以降低关键的 *COOH 的形成能,从 2.02 eV 降到 1.04 eV,有利于光催化反应的进行,从而实现 CO_2 的高效转化。

3.3 助催化剂负载

助催化剂本身通常没有活性,但助催化剂的负载可提供反应的活性位点、提高光生载流子的分离效率、抑制逆反应发生的作用,有效提高光催化反应效率。迄今为止,常见的用于 $g-C_3N_4$ 的助催化剂通常分为贵金属助催化剂和非贵金属催化剂 2 类^[17]。

贵金属可在 $g-C_3N_4$ 表面形成肖特基结,加速光生载流子的迁移和分离,其表面发生的等离激元效应有利于提高半导体的光吸收强度和范围,常见的贵金属助催化剂有 Au、Ag、Pt、Pd 等。Liu 等^[18]成功制备了负载 Au 助催化剂的 $BiVO_4/P$ 掺杂 $g-C_3N_4$ 复合材料 (Au-BVO/P-CN),Au 助催化剂的光沉积有效促进了 BVO/P-CN 的电荷分离,1.0% Au-BVO/P-CN-2 的 CO 产率为 $20.87 \mu mol/(g \cdot h)$,对 CO 的选择性高达 94.6%。原位 FT-IR 光谱显示,在光催化还原 CO_2 的过程中逐渐生成 *COOH 和 *CO 中间体, *COOH 基团被认为是光催化 CO_2 还原为 CO 的重要中间体,说明了 CO 高选择性的原因。

与贵金属相比,普通金属因成本低、材料丰富等优点受到广泛关注,常见的普通金属有 Ni、Cu 和 Co 等。Tang 等^[19]使用高能球磨法将 Ni 原子均匀负载到 $g-C_3N_4$ 上,Ni 原子高度分散并均匀地负载到 $g-C_3N_4$ 表面,从而高度分散性的活性位点促进电荷分离效率。同时,Ni 原子的掺杂提高了光催化剂的 CO_2 吸附能力,降低了反应的活化能垒,从而提高了光催化效率。Bashal 等^[20]合成了 Cu 纳米颗粒 (Cu-NPs) 负载的 2D/2D 范德华异质结 ($g-C_3N_4/MoS_2$)。DRS 紫外-可见光分析表明,Cu-NPs 的负载将复合材料的光吸收范围扩大到可见光区域,同时 Cu-NPs 的存在增强了光生电荷载流子的分离、迁移和活化,具有更强的氧化还原能力。此外,由

于 Cu-NPs 在三元 $g-C_3N_4/MoS_2/Cu$ 异质结构中充当电子捕获和反应位点,导致还原产物对 CO 有很高的选择性,对 CO 的还原率为块状 $g-C_3N_4$ 的 9.7 倍。

3.4 构建异质结结构

异质结是指 2 种或 2 种以上具有不同原子或能带结构的半导体材料紧密结合所形成的界面。在异质结构的作用下,电子可以在半导体内迁移,有效提高了电荷的分离效率,抑制光生电子空穴的重组,从而提高光催化效率。现有的 $g-C_3N_4$ 异质结构包括 I 型、II 型、Z 型、S 型、p-n 型和肖特基异质结等结构,而所有 $g-C_3N_4$ 异质结构研究最多的主要有 3 种:II 型、Z 型和 S 型^[21-22],如图 5 所示。

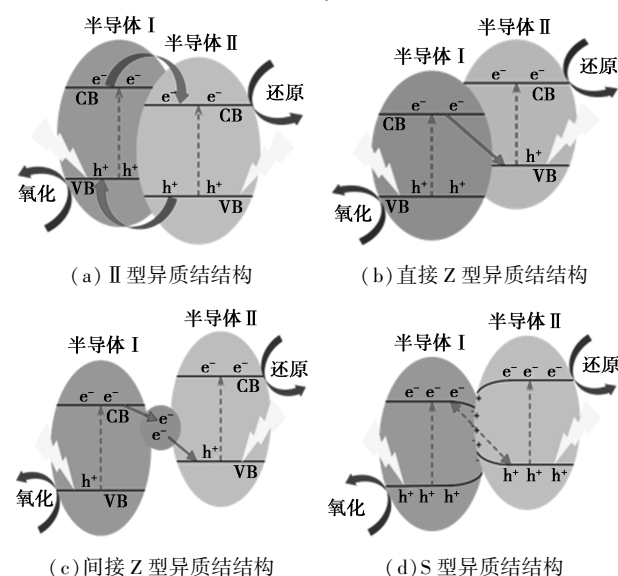


图 5 各异质结结构

3.4.1 II 型异质结

Wang 等^[23]使用静电自组装法合成了 $g-C_3N_4/SnS_2$ II 型异质结材料。II 型异质结的合成有效提高了载流子的分离效率,且复合材料的高光响应强度具有优异的电子激发和转移能力,有效提高了光催化效率。同样的,Bao 等^[24]利用碳点 (CDs) 限制的自组装策略构建了三元 $g-C_3N_4/CDs/SnS_2$ II 型异质结,CD 将 SnS_2 均匀地负载到超薄的 $g-C_3N_4$ 纳米片上,从而形成许多微型的 II 型异质结单元,此外 CD 还充当电荷转移桥以增强电荷分离,拓宽太阳光谱的利用范围,为氧化还原反应产生了丰富的光生载流子。优化后的 $g-C_3N_4/CDs/SnS_2$ II 型异质结 CO 产率为 $28.32 \mu mol/(g \cdot h)$,对 CO 的选择性为 89%,比原始 $g-C_3N_4$ 高 10.85 倍。

3.4.2 Z 型异质结

间接 Z 型异质结上的电子可以转移到电子介

质上,随后转移到另一半导体的 VB。Khaghani Mohammadi 等^[25]通过热聚合、水热合成、溶液混合超声和煅烧法,将 $g-C_3N_4$ 与 RGO 和 MoS_2 结合制备成三元 Z 型异质结材料。间接 Z 型异质结有效促进了电子-空穴的分离,解决了可见光利用和电子-空穴复合的局限性,RGO 充当电子受体,增强了电子-空穴对的分离,提高光催化还原 CO_2 的效率。10%复合材料的 CO 、 CH_4 生成速率分别为原始块状 $g-C_3N_4$ 的 18.07、7.91 倍,展现出超强的光催化潜力。

直接 Z 型异质结无须借助任何介质,电荷直接在 2 个半导体界面进行转移。构建成直接 Z 型异质结的半导体通常有金属硫化物和金属氧化物。Li 等^[26]通过形态遗传策略成功合成了一种空心球形 Z 型方案 $SnS_2/g-C_3N_4$ (SCC) 光催化剂。中空碳球的引入提高了光利用率,加强了光生电子的转移能力。且 Z 型异质结的构建为 CO_2 的吸附提供了更多的活性位点,增强了 $g-C_3N_4$ 导带中电子的还原性,从而提高了光催化效率。Wang 等^[27]通过使用 $g-C_3N_4$ 纳米片和 $\beta-Bi_2O_3$ 微花静电自组装合成了一种 $g-C_3N_4/\beta-Bi_2O_3$ Z 型异质结。在模拟阳光下,CO 的产率为 $30.56 \mu mol/(g \cdot h)$,是原始块状 $g-C_3N_4$ 的 2.67 倍。光催化 CO_2 性能的提升主要归咎于 Z 型异质结。Z 型异质结可以有效促进光生电子-空穴对的分离,并通过优化能带结构来增强氧化还原能力。此外,独特的氮空位可以稳定 *COOH 中间体,从而使 CO_2 转化为 CO 更加容易。

3.4.3 S 型异质结

Li 等^[28]使用酸辅助水热法合成了一种在 $g-C_3N_4$ 纳米片上垂直生长的 $ZnIn_2S_4$ 纳米片簇 S 型异质结材料(PCN/ $ZnIn_2S_4$)。 $ZnIn_2S_4$ 在 PCN 上垂直排列,形成了广泛的接触界面,促进了电荷运输,并提供了更易接近的活性位点。实验结果和 DFT 计算表明,界面内置电场在 S 型异质结内诱导了强烈的界面电子相互作用,促进了光生载流子的分离和迁移。因此 CO_2 还原效率得到提升,优化后的 PCN/ $ZnIn_2S_4$ 对 CO 选择性接近 100%。Qin 等^[29]采用原位生长法构建了具有 N 缺陷的 $ZnWO_4/g-C_3N_4$ S 型异质结。ZCN-40 对 CO 的选择性接近 100%,产率高达 $232.4 \mu mol/(g \cdot h)$,是原始块状 $g-C_3N_4$ 的 8.5 倍。其优异的光催化性能主要归咎于 S 型异质结和 N 缺陷。S 型异质结显著促进了光生载流子的分离和迁移,延长了载流子的寿命,极大提高了电子的还原能力。此外,N 缺陷的存在进一

步抑制了载流子的复合,提高了光生载流子的利用率,并促进 CO_2 的吸附和活化,从而提高了光催化还原 CO_2 的能力。

4 结论与展望

在光催化还原 CO_2 材料中, $g-C_3N_4$ 具有易于制备、价格低廉、带隙合适和稳定性高等优点。然而,比表面积小、电子-空穴复合快和光吸收范围有限等缺点限制了光催化效率的提高。本文中结合 $g-C_3N_4$ 的制备方法与光催化还原 CO_2 机理从形貌调控、元素掺杂、助催化剂负载和构建异质结结构 4 个方面对 $g-C_3N_4$ 光催化剂的改性进行了详细阐述。形貌调控通过制备量子点、纳米管、纳米片和三维球体结构来提高比表面积,其中 2D 结构因易于制备、活性位点丰富而广泛采用;元素掺杂如 Cl、P 和 Cu 等可提高光吸收能力,促进光生载流子的分离;助催化剂如 Au、Ni 和 Cu 等可显著提高光生载流子的分离与迁移效率;异质结结构如 II 型、Z 型和 S 型可进一步促进电荷的分离,特别是 S 型异质结在促进电荷分离、强氧化还原能力和稳定性方面展现出独特优势。

尽管基于 $g-C_3N_4$ 光催化剂的改性取得了显著的进展,但仍面临着一些挑战。①加强对 $g-C_3N_4$ 基材料光催化还原 CO_2 机制的研究。尽管有很多研究致力于 $g-C_3N_4$ 基材料光催化还原 CO_2 ,但具体的产物和反应机制的生成过程不够深入。因此,需要深入探索 $g-C_3N_4$ 基材料光催化还原 CO_2 的机制,更好地提高光催化效率。②构建一个统一的光催化剂效率的评估标准。不同的实验使用不同的光源、牺牲剂和助催化剂,很难具体评估对 $g-C_3N_4$ 基材料改性的优劣。因此,需要一个标准体系来评估不同的 $g-C_3N_4$ 基材料的光催化性能。③实现工业化应用。目前对 $g-C_3N_4$ 基材料的大部分研究都停留在实验室,在实际工业领域上尚不成熟。因此,设计和优化实际工业的反应装置是未来研究的重点。

总之,要实现 $g-C_3N_4$ 基材料光催化还原 CO_2 在工业上的广泛应用,仍需克服许多困难。因此,未来的研究应集中于对其进行改性,提高光催化活性与稳定性,同时寻找新型的氮化碳衍生物,为保护全球气候与实现双碳目标提供有效的解决方案。

参考文献

- [1] 陈阿小,郑宝旭,赵伟明,等. CO_2 催化转化技术研究进展[J]. 现代化工,2025,45(6):26-31.

- [2] Fang S, Rahaman M, Bharti J, *et al.* Photocatalytic CO₂ reduction [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2023, 3(1): 61.
- [3] 常世鑫. 石墨相氮化碳光催化还原 CO₂ 研究进展[J]. *中南民族大学学报: 自然科学版*, 2023, 42(6): 721–732.
- [4] Corma A, Garcia H. Photocatalytic reduction of CO₂ for fuel production: Possibilities and challenges [J]. *Journal of Catalysis*, 2013, 308: 168–175.
- [5] Tang J, Guo C, Wang T, *et al.* A review of g-C₃N₄-based photocatalytic materials for photocatalytic CO₂ reduction [J]. *Carbon Neutralization*, 2024, 3(4): 557–583.
- [6] Wen J, Xie J, Chen X, *et al.* A review on g-C₃N₄-based photocatalysts [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 391: 72–123.
- [7] 张元飞. 石墨相氮化碳的改性及其在光催化制氢领域的研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2024, 52(1): 85–90.
- [8] Zhang P, Li N, Li L, *et al.* g-C₃N₄-based photocatalytic materials for converting CO₂ into energy: A review [J]. *ChemPhysChem*, 2024, 25(17): e202400075.
- [9] Zhang X, Ai L, Tan C, *et al.* Chemically bonded to construct S-scheme CNQDs/Bi₂WO₆ heterostructure: The Bi-N bonds as interfacial electronic channel boosting the efficient photocatalytic CO₂ reduction under simulated sunlight [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 355: 129542.
- [10] Zhou X, Jia H, Chen W, *et al.* Novel Ag-modified g-C₃N₄ nanotubes with large specific surface area for efficient photocatalytic reduction of CO₂ [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2025, 462: 116211.
- [11] Yang B, Zhao J, Yang W, *et al.* A step-by-step synergistic stripping approach toward ultra-thin porous g-C₃N₄ nanosheets with high conduction band position for photocatalytic CO₂ reduction [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 589: 179–186.
- [12] Fang Z, Wang Q, Zhao X, *et al.* Integrating 3D porous morphology with efficient plasmonic Au nanoparticles in photo-responsive g-C₃N₄/Au hybrid photocatalyst for the enhancement of CO₂ reduction [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(2): 109478.
- [13] Khan M A, Mutahir S, Shaheen I, *et al.* Recent advances over the doped g-C₃N₄ in photocatalysis: A review [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, 522: 216227.
- [14] Alauddin, Rehman Z U, Bilal M, *et al.* Surface modification of Cl-doped g-C₃N₄ interconnected porous nanosheets for photocatalytic applications [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 127: 801–812.
- [15] Sun M, Zhu C, Wei S, *et al.* Phosphorus-doped hollow tubular g-C₃N₄ for enhanced photocatalytic CO₂ reduction [J]. *Advanced Photocatalytic Materials for Environmental and Energy Applications*, 2023, 16(20): 6665.
- [16] Qi Q, Shen W, Cai M, *et al.* Construction of Cu-modified g-C₃N₄ nanosheets for photoinduced CO₂ reduction to CO and selectivity mechanism insight [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(21): 24788–24797.
- [17] Li F, Sun C, Ren J, *et al.* Recent advances in g-C₃N₄-based photocatalysts for reduction of CO₂ [C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021, 675(1): 012181.
- [18] Liu X, Lou Z. Integration of multi-strategy modifications in an Au cocatalyst-loaded 2D/2D BiVO₄/P-doped g-C₃N₄ Z-scheme heterojunction for efficient photocatalytic CO₂ reduction [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 680: 161328.
- [19] Tang R, Wang H, Dong X A, *et al.* A ball milling method for highly dispersed Ni atoms on g-C₃N₄ to boost CO₂ photoreduction [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 630: 290–300.
- [20] Bashal A H, Alkanad K, Al-Ghorbani M, *et al.* Synergistic effect of cocatalyst and S-scheme heterojunction over 2D/2D g-C₃N₄/MoS₂ heterostructure coupled Cu nanoparticles for selective photocatalytic CO₂ reduction to CO under visible light irradiation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(2): 109545.
- [21] Que M, Cai W, Chen J, *et al.* Recent advances in g-C₃N₄ composites within four types of heterojunctions for photocatalytic CO₂ reduction [J]. *Nanoscale*, 2021, 13(14): 6692–6712.
- [22] 王若瑜. Z 型异质结光催化还原 CO₂ 研究进展 [J]. *石油炼制与化工*, 2021, 52(10): 54–61.
- [23] Wang H, Liu Z, Wang L, *et al.* Fabrication of g-C₃N₄/SnS₂ type-II heterojunction for efficient photocatalytic conversion of CO₂ [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, 34(5): 350.
- [24] Bao J J, He X, Yu S M, *et al.* Modulating interfacial charge transfer using carbon dots-confined Type-II g-C₃N₄/SnS₂ heterojunction for boosted CO₂ photoreduction [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025.
- [25] Khaghani Mohammadi N, Fatemi S J I, Researce E C. Efficient photocatalytic CO₂ conversion to CO and CH₄ by a rGO-bridged g-C₃N₄/MoS₂ indirect Z-scheme heterojunction [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2025, 64(21): 10399–10413.
- [26] Li Y, Yin Q, Zeng Y, *et al.* Hollow spherical biomass derived-carbon dotted with SnS₂/g-C₃N₄ Z-scheme heterojunction for efficient CO₂ photoreduction into CO [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 438: 135652.
- [27] Wang Y, Ban C, Feng Y, *et al.* Unveiling the synergistic role of nitrogen vacancies and Z-scheme heterojunction in g-C₃N₄/β-Bi₂O₃ hybrids for enhanced CO₂ photoreduction [J]. *Nano Energy*, 2024, 124: 109494.
- [28] Li L, Dai X, Gao K, *et al.* Customized interfacial electronic interactions in protonated g-C₃N₄/ZnIn₂S₄ S-scheme 2D/2D edge-to-face heterostructures for boosted CO₂ photoconversion [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 514: 163193.
- [29] Qin J, An Y, Zhang Y, *et al.* In Situ Assembled ZnWO₄/g-C₃N₄ S-scheme heterojunction with nitrogen defect for CO₂ photoreduction [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2024, 40(12): 2408002. ■