Journal of Advances in Physical Chemistry 物理化学进展, 2026, 15(4), 315-322
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/japc
https://doi.org/10.12677/japc.2026.154030

Hans汉斯

Ti_3C_2/CN-X光催化剂的制备实验及其性能表征

刘灿群，阮文科*

岭南师范学院化学化工/高分子材料与工程系，广东 湛江

收稿日期：2026年9月14日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月9日

摘 要

介绍一个综合化学实验——Ti_3C_2/CN-X光催化剂的制备及其性能表征。针对石墨相氮化碳存在光生载流子复合率高、比表面积有限，光催化产氢活性不足的问题，本研究面向化学类高年级本科生设计开发一项材料光催化方向综合化学教学实验。实验采用氢氟酸选择性刻蚀Ti_3AlC_2制备少层Ti_3C_2 (MXene)，以盐辅助焙烧法得到改性氮化碳CN-X，进一步通过液相超声复合工艺构建不同Ti_3C_2负载比例的Ti_3C_2/CN-X异质结光催化材料；借助XRD、SEM-EDS以及光催化分解水产氢测试系统完成材料的结构表征与性能评价。实验结果表明，当Ti_3C_2负载质量分数为10%时，Ti_3C_2/CN-X复合材料产氢速率可达78.2 μmol/h/g，相较纯CN-X提升显著。该实验将前沿MXene基光催化科研成果转化为本科教学项目，可训练学生材料合成、仪器表征与性能评价的综合实验技能，帮助学生理解异质结光催化作用机制，培养科研思维与创新兴趣，适合纳入化学相关专业高年级综合化学实验课程。

关键词

光催化，氮化碳，Ti_3C_2/CN-X，综合化学实验，实验技能

Preparation and Performance Characterization of Ti_3C_2/CN-X Photocatalyst

Canqun Liu, Wenke Ruan*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

Received: September 14, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 9, 2026

Abstract

This work introduces a comprehensive chemistry experiment on the preparation and performance

*通讯作者。

文章引用: 刘灿群, 阮文科. Ti_3C_2/CN-X 光催化剂的制备实验及其性能表征[J]. 物理化学进展, 2026, 15(4): 315-322.
DOI: 10.12677/japc.2026.154030

characterization of Ti_3C_2/CN-X photocatalysts. Aiming at the drawbacks of graphitic carbon nitride, including high recombination rate of photogenerated charge carriers, limited specific surface area and insufficient photocatalytic hydrogen-evolution activity, this work develops a comprehensive chemistry teaching experiment on material photocatalysis for senior undergraduates majoring in chemistry. Few-layer Ti_3C_2 (MXene) is synthesized via selective hydrofluoric-acid etching of Ti_3AlC_2. Modified carbon nitride CN-X is obtained by a salt-assisted calcination strategy. Ti_3C_2/CN-X heterojunction photocatalysts with varied Ti_3C_2 loadings are further fabricated through liquid-phase ultrasonic compounding. X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), and a photocatalytic water-splitting hydrogen-evolution test system are employed for structural characterization and performance evaluation of the as-prepared materials. Experimental results demonstrate that the Ti_3C_2/CN-X composite with 10 wt% Ti_3C_2 achieves an optimal hydrogen-evolution rate of 78.2 $\mu mol \cdot h^{-1} \cdot g^{-1}$, exhibiting a remarkable improvement compared with pure CN-X. Translating cutting-edge research achievements of MXene-based photocatalysis into an undergraduate teaching program, this experiment can train students' comprehensive experimental skills in material synthesis, instrumental characterization and performance assessment. It also facilitates students' understanding of the heterojunction photocatalytic mechanism and cultivates their scientific thinking and innovative interest. Hence, it is suitable to be incorporated into the comprehensive chemistry experiment curriculum for senior students majoring in chemistry-related disciplines.

Keywords

Photocatalysis, Carbon Nitride, Ti_3C_2/CN-X, Comprehensive Chemistry Experiment, Experimental Skills

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

随着现代科学技术的快速发展，为了使学生可以更好地接触科学前沿问题，需要将最新科研成果引入到高年级本科生的综合性实验教学中，从而改革现有实验教学内容，从而激发本科生的科研兴趣和热情[1]-[3]。

21 世纪，一方面，随着时代科技的进步和发展，另一方面，随着人口增长迅速，能源枯竭与环境污染已经成为了阻碍人类社会发展的严峻挑战。为了寻找新的能源来替代那些将近枯竭的能源，经过科学家的努力终于发现了高效且无污染的氢能源，并且可以利用取之不尽用之不竭的太阳能来制取氢能，而实现这一理想的中介则是光催化剂，科学家们已经能够利用光催化技术将丰富的太阳能可见光转化为可再生的清洁能源氢能，这不仅能够有效的降低经济成本并且可以解决人类目前的所遇到的难题。而光催化应用技术研究重点和主要核心组成部分为光催化剂，在诸多光催应用化材料中，类石墨型氮化碳因其具有高效的光催化性能，及其主要特点也就可以直接利用太阳能来降解水并产生大量氢气，成为了当前研究的热点[4]-[10]。石墨型氮化碳 g-C_3N_4 能够吸收可见光、化学稳定性良好和热稳定性，来源丰富、并且无毒、制备工艺也简单。是目前最具有发展潜力的新型材料之一[11]-[15]。g-C_3N_4 作为新一代的材料，它是一种新型的非金属二维光催化材料，由于它具有独特的电子结构和性能，无毒并且设计和制备简单，成本低等优点，因而获得了科学界的普遍重视，在光催化技术领域有着广阔的研究前景[16]。石墨相氮化碳(g-C_3N_4)依然存在着一些不足之处，如自身的光生电子和空穴的复合率高、比表面积小等都大大降低了

其光催化性能，为了提高其光催化活性，增大比表面积，促进电子－空穴的分离[17]。目前大量文献聚焦Ti_3C_2/g-C_3N_4复合材料的科研开发，但将该前沿体系转化为可面向本科教学、兼顾安全性、可重复性、可操作性的综合化学教学实验的报道仍然较少。

鉴于此，笔者结合以往的科研经历，将“Ti_3C_2/CN-X光催化剂的制备及其性能表征”转化为综合化学实验。本实验通过构建异质结构的方法来合成一种全新的光催化复合材料Ti_3C_2/CN-X，克服了前面的这些缺点，优化了光催化性能，通过产氢系统在可见光照射下分解水的性能测试，证实与Ti_3C_2的复合能够极大提高 g-C_3N_4光催化剂的光催化活性。本教学实验方案具备较好的可重复性：合成条件参数明确，表征手段均为高校化学实验室常规仪器；实验链条完整覆盖“原料预处理－材料合成－微观结构表征－光催化性能评价”全流程，能够多层次锻炼本科生动手操作、图谱解析、数据分析以及对光催化机理理解的综合能力。本实验构建了Ti_3C_2/CN-X异质结构复合体系，为构建新型复合可见光催化材料开辟了一条新途径。该综合性实验的设计体现了材料研究“合成制备－分析表征－实际应用”的特点，不仅可以使学生掌握氮化碳与Ti_3C_2的合成方法和表征手段，还能通过该实验学习光催化性能测试的技术，提高综合运用材料化学基本原理和实验技能解决实际问题的能力。

2. 实验原理、试剂、仪器及氢氟酸安全操作规程

2.1. 光催化反应原理

石墨相氮化碳 CN-X 在正常的光照条件下，由石墨相氮化碳 CN-X 复合材料具有电子填充的价带和一个没有电子填充的导带，在光照作用下被激发，经历一个光敏氧化还原过程，其中在价带(VB)和导带(CB)中间存有一个间隙，这一间隙可称为禁带也被称为带隙能量(Ea)。当半导体材料所接受的可见光辐射超过它所需要的带隙能量时，处于价带(VB)上的一个光生电子(e^-)自然地就会被激发并从价带跃迁到导带(CB)上，且在价带(VB)会留下同跃迁的电子总数目相同的空穴(h^+)，催化剂表面的水分子(H_2O)将价带上空穴位点(h^+)捕获并将其氧化形成羟基自由基(·OH)。与此同时导带(CB)中的光生载流电子(e^-)和溶解氧反应并形成超氧自由基($\cdot O_2^-$)。所得到的空穴(h^+)、羟基自由基(·OH)和超氧自由基($\cdot O_2^-$)三个活性物质与反应物反应，将会促进这个过程的进行。

在整个反应过程中，强氧化自由基的产生和电荷的转移都提高了半导体材料的光催化效率。当光子能量小于或未能达到半导体材料吸收阈值时，或者光生电子无法迁移到导带(CB)，会造成无法被吸附在催化剂表面的反应物所捕获，则光生电子(e^-)-空穴(h^+)对会快速地重新结合，因此会导致光催化效果降低[13]。

2.2. 实验试剂

49%氢氟酸(49%HF)，Ti_3AlC_2，尿素，LiCl，NaCl，KCl，无水乙醇。

2.3. 实验仪器

移液管，坩埚，胶头滴管，玻璃棒，搅拌子，药勺，分析天平，烧杯，超声波振荡器，真空干燥箱，马弗炉，高速离心机，真空干燥箱，扫描电子显微镜(SEM)，X 射线晶体衍射仪(XRD)。

2.4. 氢氟酸(HF)危险性说明、标准操作规程(SOP)及应急处置措施

重要警示：49%氢氟酸属于极度危险腐蚀性化学品，可穿透皮肤、腐蚀骨骼，微量接触即可造成严重迟发性损伤甚至死亡，本步骤必须在经过安全培训的教师全程监护下开展，严禁本科生独立操作。

2.4.1. 主要危险性

HF 具有强腐蚀性与高挥发性，蒸气会损伤眼及呼吸道黏膜，吸入可诱发肺水肿；液态 HF 接触人体

后，氟离子会穿透皮肤，与体内钙镁结合造成深部组织乃至骨骼坏死，损伤存在痛感迟发特征，早期体表可能无明显灼伤。实验全程严禁玻璃、陶瓷器皿接触 HF，需全部采用 PTFE/PP 塑料容器，避免与碱类物质接触。

2.4.2. 标准安全操作规程(SOP)

全部操作必须在通风橱内开展，提前备齐应急物资。操作人员穿戴双层耐 HF 丁腈手套、护目镜配防护面屏、耐酸碱实验服及酸性滤盒防毒半面罩，禁用普通橡胶手套。投料时缓慢将 Ti_3AlC_2 加入 HF 体系，反应放热，禁止快速投料以防喷溅；容器加盖塑料薄膜并扎孔泄压。所有转移取样使用塑料器具；实验废液收集于专用塑料桶，加过量碳酸钙/氢氧化钙沉淀氟离子后交由危废处置；实验完毕先中和擦拭通风橱台面，再洗手、卸除防护装备。

2.4.3. 应急处理措施

皮肤接触：立刻涂抹葡萄糖酸钙凝胶，流动清水冲洗 ≥ 15 min，无论是否疼痛均需立刻送医；

眼部溅入：洗眼器持续冲淋眼部 ≥ 15 min，随即就医；

吸入蒸气：迅速转移至空气新鲜环境并及时就诊；

试剂洒落：穿戴全套防护，撒氢氧化钙粉末处理，反应后的固体按危废收集处置。

3. 实验步骤

(1) Ti_3C_2 的制备。称取 5.0 g 的 Ti_3AlC_2 加入到 100 ml 的 49% HF 中，在加入 Ti_3AlC_2 的过程中温度会升高，为了防止 HF 的挥发，在塑料烧杯上蒙上一层薄膜并戳几个小孔，室温下搅拌 72 h，在这个过程中 HF 还是会挥发掉，因此我们需要在搅拌的过程中间再加入 20 ml 的 HF，搅拌 72 小时后然后用去离子水清洗到 pH = 7 后将产物加入到 100 ml 的 DMSO 中超声 1 h 后搅拌 24 h，为的是尽可能的使 Ti_3C_2 的多层被 DMSO 撑开，最终将多层剥离成为少层 Ti_3C_2，在搅拌了 24 h 后离心洗涤掉 DMSO 并用无水乙醇沉淀后用真空干燥箱干燥 12 h。

(2) CN-X 的制备。称取 50 g 的尿素(天津大茂)加入坩锅中于马弗炉中，温度升到 500℃焙烧 2 h，获得不完全聚合的 C_3N_4；将 3 g 的混合盐(NaCl 和 KCl)加到不完全聚合的 C_3N_4 中，充分研磨混合均匀后，以温度为 550℃后焙烧 2 h 后冷却到室温，用热的去离子水搅拌洗涤除去未反应的盐(未反应的盐可能不容易清洗干净，要在烧杯搅拌 10 分钟后再离心机离心清洗多几次)，然后用无水乙醇沉淀后放到真空干燥箱 80℃，12h，得到 CN-Na 和 CN-K 的混合物(CN-X)。

(3) Ti_3C_2/CN-X 复合光催化剂的制备。分别称量 5.0 g 的 CN-X 和 Ti_3C_2 (Ti_3C_2:CN-X = 5%/10%/15%/20%)加入到无水乙醇中超声分散 3 h，然后将 2 个分散好的分散液混合搅拌 1 h，用无水乙醇进行沉淀，然后用真空干燥箱 80℃干燥 12 h。

(4) 样品表征。实验所制得的多层 Ti_3C_2 样品通过 X 射线的 XRD 测定，和 Ti_3AlC_2、多层 Ti_3C_2、少层 Ti_3C_2、g-C_3N_4、g-C_3N_4-X/少层 Ti_3C_2 等通过扫描电镜 SEM 和 EDS 能谱测定其结构，最后通过产氢系统以三乙醇胺作为牺牲剂并以纯的氮化碳 CN 作为参考基准来测定 g-C_3N_4-X/少层 Ti_3C_2 产氢效率。

4. 结果与讨论

4.1. 多层 Ti_3C_2 的 XRD 图分析

如图 1 为 HF 刻蚀 Ti_3AlC_2 中的 Al 后生成多层 Ti_3C_2 的 XRD 谱图，通过参考文献[14]可知 Ti_3AlC_2 在被 HF 刻蚀后的衍射峰和 39˚对应的最强峰都消失，且 Ti_3AlC_2 对应的(002)和(004)峰变宽且强度有所下降，并向低的 2θ 角推移，这些峰正是 Ti_3C_2 特有的特征峰，Ti_3C_2 在 35.9˚、41.8˚、61.2˚对应的衍射峰分

别对应参考文献中的(111)、(200)、(220)晶面，这与文献报道的基本一致，61.2˚对应的衍射峰的峰宽较窄，峰型尖锐，说明该成分结晶性较好；当二倍衍射角为 26.5˚时对应的是碳元素的衍射峰，由 3 谱图所反映的晶体结构符合碳化钛的结构，而在衍射角为 9.517˚时所对应的衍射峰为 MXene 相的有序的层状结构的衍射峰，这一切都表明 Ti_3AlC_2 中的 Al 已经被除去，所以多层 Ti_3C_2 制备是成功的。

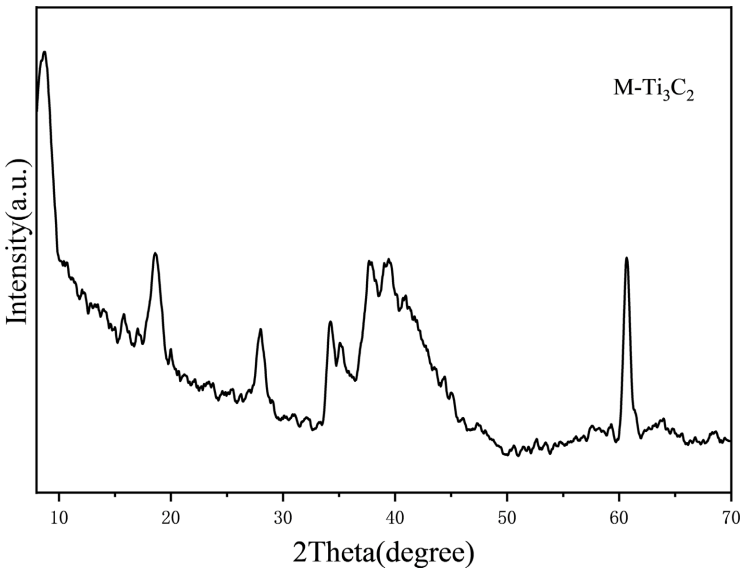


Figure 1. XRD patterns of multilayer Ti_3C_2
图 1. 多层 Ti_3C_2 的 XRD 图

4.2. SEM 扫描电镜图分析

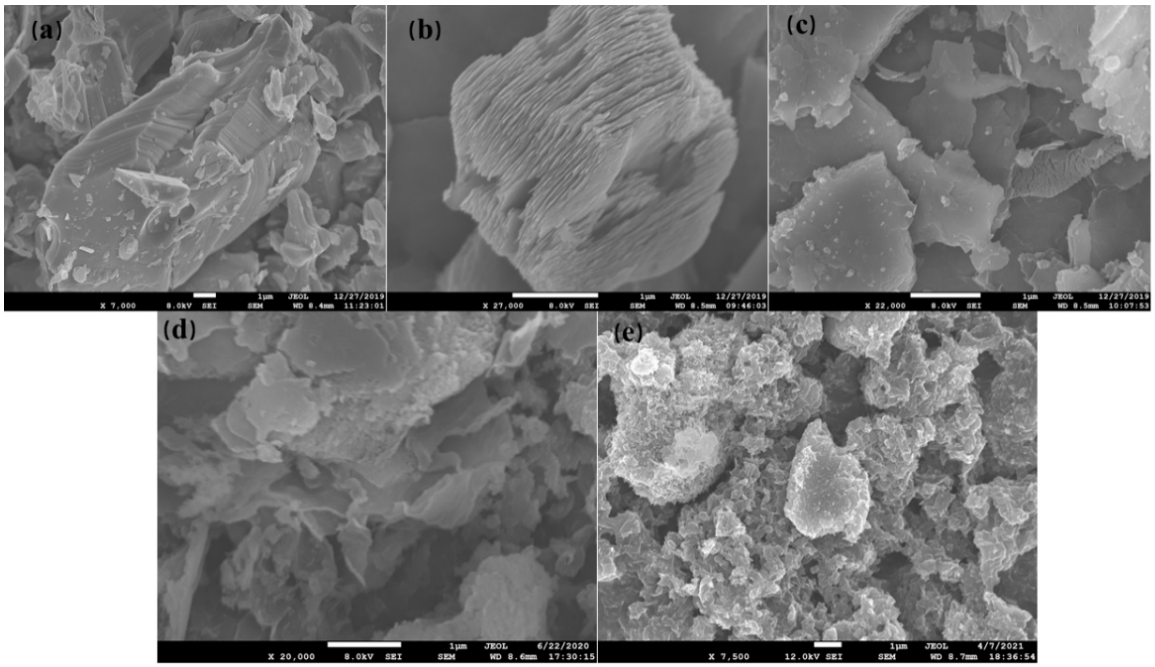


Figure 2. (a) Ti_3AlC_2; (b) multilayer Ti_3C_2; (c) few-layerTi_3C_2; (d) g-C_3N_4; (e) g-C_3N_4-X/few-layer Ti_3C_2
图 2. (a) Ti_3AlC_2；(b) 多层 Ti_3C_2；(c) 少层 Ti_3C_2；(d) g-C_3N_4；(e) g-C_3N_4-X/少层 Ti_3C_2

图 2(a)为 MAX 相的 Ti_3AlC_2 扫描电镜照片。由图可以看出 Ti_3AlC_2 表现出了紧密的层状堆叠结构；图 2(b)为 MXene 结构的多层 Ti_3C_2 由图可以看出它不同于 Ti_3AlC_2，层与层之间存在一定的间隙整体比较蓬松，这就是 Ti_3AlC_2 通过(49%)HF 的选择性刻蚀掉 Ti_3AlC_2 中的 Al 后所得到的产物；图 2(c)为少层 Ti_3C_2，由图 2(c)就可以看出其为寡层而不像图 2(b)中的层与层之间堆叠有序，而是成片状的，少层的 Ti_3C_2 是通过提取上层清液中进行离心沉淀或用图 2(b)中的多层 Ti_3C_2 通过 3 到 5 个小时的超声剥离后离心沉淀所得；图 2(d)为纯 g-C_3N_4，由图可以看出 g-C_3N_4 为二维纳米片结构且有点卷曲现象，其由 g-C_3N_4 超薄结构造成的；图 2(e)为 g-C_3N_4-X/少层 Ti_3C_2，将掺杂了金属元素的 g-C_3N_4-X 与少层 Ti_3C_2 按一定比列分别经过超声混合干燥后得到的产物，由图 2(e)可以看出该产物为不规则的网格多孔状结构，这是由于长时间的超声震荡把少层 Ti_3C_2 震得比较碎而 g-C_3N_4-X 的结构比较牢固不易被震碎，所以形成了不规则的网孔状，而震碎的 Ti_3C_2 正好附着在其表面，所以表面看起来比较粗糙，这种结构可以极大的增加了其比表面积，使得少层 Ti_3C_2 可以充分的复合在 g-C_3N_4-X 的表面，可极大的改变了纯 g-C_3N_4 的性能。

4.3. g-C_3N_4-X/少层 Ti_3C_2 的 EDS 能谱图分析

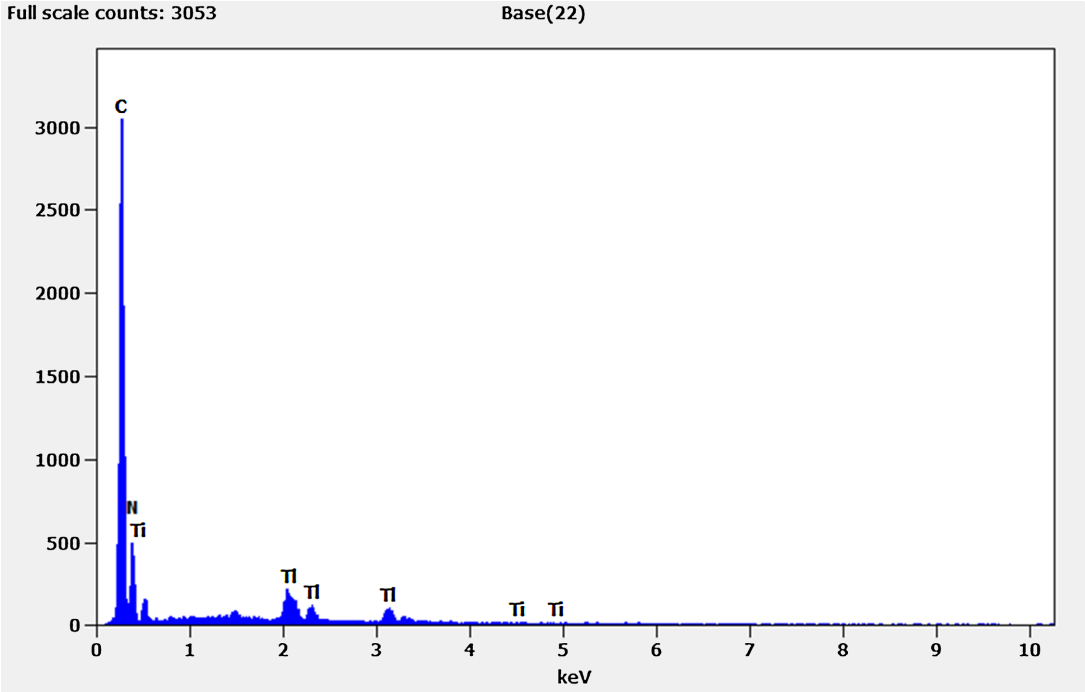


Figure 3. EDS spectrum of g-4 g-C_3N_4-X/few-layer Ti_3C_2
图 3. g-C_3N_4-X/少层 Ti_3C_2 的 EDS 能谱图

如图 3 中图为其 EDS 能谱图，我们可以由图可以得出该材料由 C、N、Ti 三种元素组成，其中的元素比例也相对合理，符合我们的预期结果，当然 EDS 分析的数据精确性受到分析仪器环境和样品制备的影响，各元素的比例与理论数值有些误差，因此该数据只能作为一定参考作用。由图 3 可知我们所制得的样品是成功的。

4.4. Ti_3C_2/CN-X 产氢效率分析

图 4 分别是纯的氮化碳 CN 和 g-C_3N_4 与不同比例的 Ti_3C_2 通过超声震荡和充分研磨的方法均匀混合后在产氢系统的仿太阳光的照射下测量它们的产氢效率，如图 4 所示纯氮化碳 CN、g-C_3N_4/5%Ti_3C_2、g-

C_3N_4/10%Ti_3C_2、g-C_3N_4/15%Ti_3C_2、g-C_3N_4/20%Ti_3C_2 分别对应的光催化产氢效率为 3.67 μmol/h/g、60.2 μmol/h/g、78.2 μmol/h/g、59.3 μmol/h/g、40.2 μmol/h/g 通过比较可以看出纯氮化碳 CN 的产氢效率是非常低的，为 3.67 μmol/h/g，而通过掺杂金属元素和负载 Ti_3C_2 做助催化剂后产氢效率有所提高，且当 Ti_3C_2 为 g-C_3N_4 的 10%时既 g-C_3N_4/10%Ti_3C_2 的产氢效率是最高的，而其它过多或过少比例的 Ti_3C_2 都会逐渐降低其产氢效率，这是因为金属半导体材料 Ti_3C_2 作为助催化剂，且具有很强的导电性，将其与氮化碳半导体进行复合，可以有效减缓电子－空穴的复合速率，当 Ti_3C_2 的量过少时虽降低了电子－空穴的复合率，但还是不能够完全的将电子快速的从价带转移到导带，依旧还有可以提高的空间，而 Ti_3C_2 过多时，虽然 Ti_3C_2 可以降低电子－空穴的复合率，但是多余的 Ti_3C_2 附着于氮化碳的表面，阻止了 H_2O 在样品表面的吸附性能，同时多余的 Ti_3C_2 覆盖在样品氮化碳表面的活性位点，因此降低了其与水溶液的接触率而使得产氢效率降低。

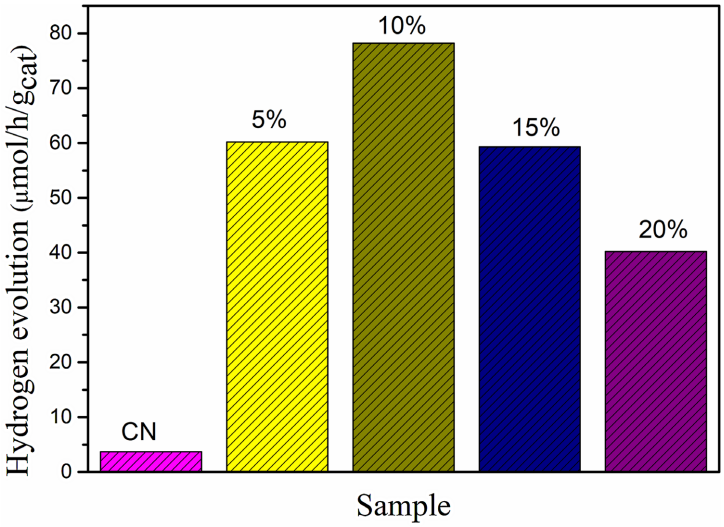


Figure 4. Photocatalytic H_2 evolution efficiency of g-C_3N_4 with different percentages of Ti_3C_2
图 4. g-C_3N_4/不同百分比 Ti_3C_2 的光催化产氢效率

5. 结语

本实验通过选择性刻蚀和超声震荡等方法制得 Ti_3C_2/CN-X 光催化剂，并通过产氢系统、X 射线衍射 XRD、扫描电镜 SEM、EDS 能谱等对其进行表征，实验制得的 Ti_3C_2/CN-X 光催化剂对水溶液有一定的降解作用，并产生氢气，研究表明：g-C_3N_4 通过掺杂金属元素 Na 和 K 以及混合半导体材料 Ti_3C_2 形成的异质结构，有效的增加了氮化碳表面的比表面积以及活性位点，并且加快了光生电子的转移速度，降低了电子－空穴的结合效率，从而大大提高了 Ti_3C_2/CN-X 光催化剂的光催化效率及产氢的效率，当 Ti_3C_2 占 10%时 Ti_3C_2/CN-X 光催化剂的产氢速率达到最高，为 78.2 μmol/h/g 作为一种高效的可见光响应光催化剂，其在环境污染治理等领域中具有潜在的应用前景。通过该综合化学实验来提高本科生的实验技能，让学生对科研的最新研究有所了解，提高学生的科研兴趣。

基金项目

湛江市科技计划项目(2026B01114、2025B01111 和 2026B01062)。

参考文献

[1] 刘治彤, 赵子逸, 彭渤, 曲玥名, 田松麟, 俞寿云. 过渡金属催化的 6-苯基-5, 6-二氢-2H-吡喃-2-酮的合成——推

荐一个大学有机化学综合实验[J]. 大学化学, 2022, 37(2): 228-237.

[2] 辜敏, 岳斌. 多酸配位聚合物的制备与表征——推荐一个综合化学实验[J]. 大学化学, 2020, 35(1): 92-97.

[3] 谢浩源, 肖伟英, 唐舒如, 邓欣, 谭竞, 吕泽成, 陈作义, 刘文婷, 许伟钦. 多孔碳包覆铜纳米颗粒的制备及性能表征——推荐一个化学综合实验[J]. 大学化学, 2023, 38(2): 227-232.

[4] Zhang, X., Zhang, Z. and Zhou, Z. (2018) MXene-Basedmaterials for Electrochemical Energy Storage. *Journal of Energy Chemistry*, **27**, 73-85.

[5] Barsoum, M.W. and Eklund, P. (2019) The $M_{n+1}AX_n$ Phases: The Precursors for MXenes. In: Anasori, B. and Gogotsi, Y., Eds., 2*D Metal Carbides and Nitrides* (*MXenes*), Springer International Publishing, 15-35. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19026-2_2

[6] 冯万林. Ti_3C_2 MXene 的合成及其吸波性能的研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 中国工程物理研究院, 2018.

[7] Liebig, J. (1834) Uber Einige Stickstoff-Verbindungen. *Annalen der Pharmacie*, **10**, 1-47. https://doi.org/10.1002/jlac.18340100102

[8] 李师, 王毅. 石墨相氮化碳的制备和应用进展[J]. 皮革与化工, 2020, 37(3): 22-32.

[9] Kroke, E., Schwarz, M., Horath-Bordon, E., Kroll, P., Noll, B. and Norman, A.D. (2002) Tri-*S*-Triaqine Derivatives. Part I. From Trichloro-Tri-*S*-Triazine to Graphitic C_3N_4 Structures. *New Journal of Chemistry*, **26**, 508-512. https://doi.org/10.1039/b111062b

[10] 汪成. g-C_3N_4 基复合材料的结构调控及光催化净化 NO_x 和产氢性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆工商大学, 2020.

[11] 何亚萍, 张常虎, 肖皓月, 韩权, 杨晓慧, 霍燕燕. 双亲模板制备 Mb-g-C_3N_4 生物复合材料及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(1): 135-138.

[12] Teter, D.M. and Hemley, R.J. (1996) Low-Compressibility Carbon Nitrides. *Science*, **271**, 53-55. https://doi.org/10.1126/science.271.5245.53

[13] Maeda, K., Wang, X., Nishihara, Y., Lu, D., Antonietti, M. and Domen, K. (2009) Photocatalytic Activities of Graphitic Carbon Nitride Powder for Water Reduction and Oxidation under Visible Light. *The Journal of Physical Chemistry C*, **113**, 4940-4947. https://doi.org/10.1021/jp809119m

[14] 李宪华, 张雷刚, 王雪雪, 等. 界面聚合法制备 PANI/g-C_3N_4 复合催化剂及其热稳定性和可见光催化性能[J]. 物理化学学报, 2015, 31(4): 764-770.

[15] 刘润学. g-C_3N_4 基复合材料制备及其催化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2020.

[16] 李福颖, 陈蓉, 林鹏. 均相沉淀法制备纳米 ZnO 及其光催化性能研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2013, 25(1): 18-20.