

纳米Fe-g-C₃N₄的制备及其光催化降解Cr(VI)的性能研究

夏宝国¹, 阿成·阿德力别克², 高若普¹, 袁宝艳¹, 刘天宝^{3*}, 闫秀玲^{1*}

¹伊犁师范大学化学化工学院, 新疆 伊宁

²伊犁师范大学法学院, 新疆 伊宁

³东北石油大学化学化工学院, 黑龙江 大庆

收稿日期: 2024年5月9日; 录用日期: 2024年6月18日; 发布日期: 2024年6月26日

摘要

随着工业的发展, 大量的工厂将含铬Cr(VI)废水排放至河流湖泊中, 使得水体污染愈加严重, 生态问题日益严峻, 环境污染问题也越来越引起人们的注意。因Fe-g-C₃N₄材料具有制备工艺简单、原始材料成本低、绿色环保、降解性能较好等优点, 在光催化领域值得我们研究。本论文通过元素掺杂和形貌调控的手段对CN的组成和结构进行了改良, 主要探究Fe-g-C₃N₄对模拟工业污水中重金属离子Cr(VI)的降解, 并对光催化的部分规律通过控制变量法逐个探究和总结。研究结果表明, 将原料三聚氰胺换为尿素可有效的降低合成光催化剂的成本; (a/b/c)Fe-g-C₃N₄对光催化性能的影响中, 实验中m_{Fe} = 2 g时, 降解效果较好; 在不同pH实验中, pH = 3时, 降解效果较好; 在等体积的拟废水溶液中, 并不是光催化剂添加的越多, 光催化性能越好。虽然降解程度相近, m = 1.5 g时降解效果较好。

关键词

光催化剂, 元素掺杂, 含铬废水, 纳米Fe-g-C₃N₄

Preparation of Nano-Fe-g-C₃N₄ and Its Photocatalytic Degradation of Cr(VI)

Baoguo Xia¹, A Cheng·Adlibek², Ruopo Gao¹, Baoyan Yuan¹, Tianbao Liu^{3*}, Xiuling Yan^{1*}

¹College of Chemistry and Chemical Engineering, Yili Normal University, Yining Xinjiang

²Law School, Yili Normal University, Yining Xinjiang

³College of Chemistry and Chemical Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang

Received: May 9th, 2024; accepted: Jun. 18th, 2024; published: Jun. 26th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 夏宝国, 阿成·阿德力别克, 高若普, 袁宝艳, 刘天宝, 闫秀玲. 纳米Fe-g-C₃N₄的制备及其光催化降解Cr(VI)的性能研究[J]. 材料科学, 2024, 14(6): 852-860. DOI: 10.12677/ms.2024.146095

Abstract

With the development of industry, a large number of factories discharge chromium-containing Cr(VI) wastewater into rivers and lakes, which makes water pollution more and more serious, ecological problems are increasingly severe, and environmental pollution problems have attracted more and more attention. Fe-g-C₃N₄ material has the advantages of simple preparation process, low cost of raw material, green environmental protection and good degradation performance, so it is worthy of our research in the field of photocatalysis. In this paper, the composition and structure of CN are improved by means of element doping and morphology regulation, and the degradation of Cr(VI) in simulated industrial wastewater by Fe-g-C₃N₄ is mainly investigated, and some laws of photocatalysis are investigated and summarized one by one by control variable method. The results show that the cost of synthetic photocatalyst can be reduced effectively by changing the raw material melamine to urea. As for the effect of (a/b/c)Fe-g-C₃N₄ on photocatalytic performance, the degradation effect is better when $m_{Fe} = 2$ g in the experiment; in different pH experiments, when pH = 3, the degradation effect is better; In the same volume of pseudo-wastewater solution, it is not the more photocatalyst added, the better the photocatalytic performance. Although the degradation degree is similar, the degradation effect is better when $m = 1.5$ g.

Keywords

Photocatalyst, Element Doping, Chromium-Containing Wastewater, Nanometer Fe-g-C₃N₄

Copyright © 2024 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

传统的化石能源如煤炭、石油和天然气等不可再生能源，在我们的生活中担当着不同的重要角色，依附传统化石能源催生的各种技术和发明，给近现代社会带来了翻天覆地的变化。然而，化石能源的大量消耗和温室气体的大量排放，这也导致了日益严重的能源危机和环境污染[1] [2] [3] [4] [5]。其中，土壤和水资源是我们赖以生存的最基本保障，为了保护我们的生态环境，由于社会经济发展和人类健康对水的需求不断增加，水资源污染问题受到全球科学家的高度关注[6]。因此，过度用水、水污染和气候变化是造成水资源短缺的主要原因。我们非常有必要对水质进行监测，并通过不断试验构建成新型的绿色环保污水处理系统，以减少重金属污染及部分有机污染物。一九六七年，日本的学术工作者藤岛昭教授首次报道，发现二氧化钛单晶表面在强烈紫外光直接照射作用下，水质出现了光致分解反应现象，从而也开启起了光催化降解单晶方法发展的新纪元[7]。自发现半导体存在光电化学水裂解过程开始，光催化水降解作为一项先进的催化氧化技术就获得了快速的发展。光催化反应是一种基于在光催化剂的存在下，在正常光照条件作用下所具有的选择性氧化及还原的能力，从而也可以同时达到选择性净化多种污染物、物质及其合成代谢到再转化功能等目的[8]。

1.1. 重金属铬(VI)的来源、危害及处理方法

由于我国城市化和工业化的快速发展，皮革、电镀、印染等行业的相继崛起带动了经济的迅猛发展，

这也给环境带来了不可抗拒的压力。重金属污染问题成为了当前最突出的土壤环境问题[9]，铬、镉、铅、砷和汞被列为五大毒物，同时铬也是对人体危害最大的 8 种化学物质之一[10]。治理铬污染的方法有吸附法、电动法、生物法、光催化等方法。并通过氧化物-载体相互作用，可以在载体材料的活性位点上形成更小的纳米颗粒[12]。塑性可以通过不同的策略形成，如自组装或原位形成方法。后面的几种方法包括沉淀法、溶胶-凝胶法、溶剂热法和微波辅助法。这可以增加光催化剂的总表面积，并且可以提高材料的光电效应[13]。

1.2. 光催化机理

诸多研究及实验工作表明，光催化的反应作用原理主要是光电效应，即利用半导体光催化剂的分子受到与其能量相匹配或明显大于其带隙能量(E_g)的强光的照射发生作用的过程[14]。该过程主要包括，从一个半导体材料上电子的电子价带位置之间和正空穴导带位置之间的分别被激发后形成了一个光生电子穴和一个正空穴，该过程一般认为是一个电子在另一个电子中进行填充电子价带位置(VB)的过程，激发的光到了另外的一个电子空位导带(CB)中，在其产生(VB)的过程中只留下了一个电子正空穴，随后将激光催化下来的两个电子空位正穴和四个电子空穴分别用来与氧、水和羟基进行反应，以生成活性氧化物基团(如羟基自由基和超氧化物自由基阴离子具有很强的氧化能力)的光降解反应。光催化机理如图 1 所示，光催化反应分解水的过程包含以下四个步骤[15]：光的吸收、光致引发电荷分离、光致电荷输送及光催化剂表面的氧化还原反应过程。简要的说，经太阳光照射，半导体光催化剂吸收的辐射能量大于或等于半导体带隙的光生电子($h\nu$)，光子从价带(VB)被激发到导带(CB)，并产生大量的电子-空穴对(又称激子)。紧接着激子的分离生成了自由电子和空穴，经溶液液输送到达半导体表面，进一步发生氧化(OER)和还原反应(HER)，产生氧气与氢气。在电荷传输的进程中，电子可能会与空穴在体相和其表面进一步复合，导致大部分能量以热能的形式损失，这对光催化历程是非常不利的。

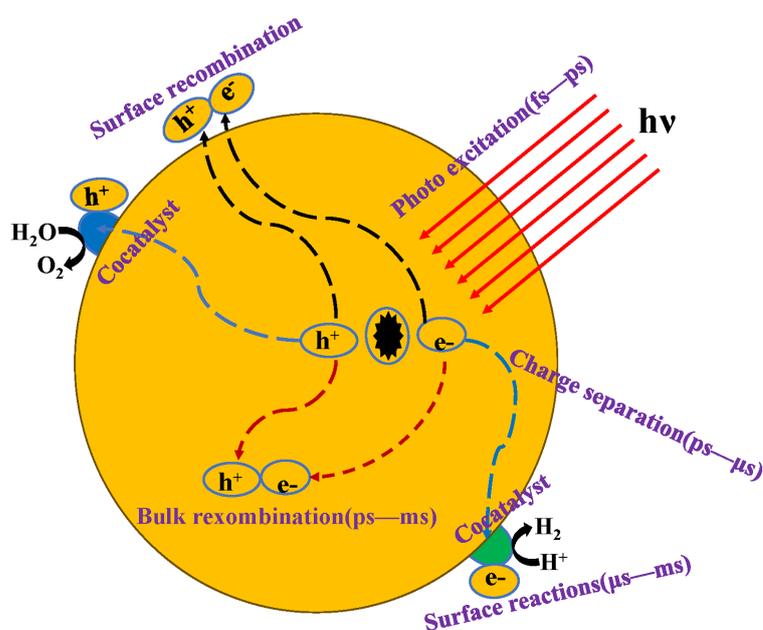
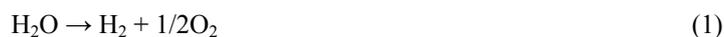


Figure 1. Schematic diagram of reaction mechanism of photocatalytic process
图 1. 光催化过程反应机理示意图

为充分确保光生载流子能够快速进行氧化反应与还原反应，光催化剂的 CB、VB 位置要同水的氧化

电位与还原电位尽可能匹配。并要发生下述反应：



为确保能更好地产生最大限度的氢气，研究工作者以光催化过程中产生氢气的半反应为研究重心，还综合考虑到要进行光催化时，不能忽略气体的分离过程。研究发现，由于光催化进行时，会形成大量的空穴，若要提高产生氢气的效率，则需要在光催化产氢过程中，借助高性能的空穴牺牲剂来填补空穴，以此来提高光催化效率，高效的空穴牺牲剂需要满足其还原电位要低于 $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 的还原电位[15] [16]。常见的空穴牺牲剂有甲醇、乙醇以及三乙醇胺等。

此外，深度氧化法也是近年来备受关注的去除农药、有机染料和工业有机废弃物等有机污染物的新方法。对于废水处理中的 AOPs，高活性的羟基自由基($\text{OH}\cdot$)是有机污染物氧化反应中最强的氧化物质[17] [18]。由于其可进行高效的氧化还原反应，可以将其作为光催化反应的一个重要过程用以探究降解 Cr(VI) 。

1.4. 本文的选题依据和研究内容

由于石墨相氮化碳材料具有来源广泛、环保无毒、物美价廉、且层片状材料便于长期贮存、运输和使用等优点[19]。作为一种新型的绿色环保材料，其孔隙较为丰富，物化性能可以在很大范围内发生改变。最重要的是，石墨相氮化碳的水溶液与金属非金属掺杂能力较高，且形成条件温和、形成速度快，制得的材料晶型均相对一致。一直以来，研究人员对石墨相氮化碳进行了大量的研究，由于其简单的制备工艺、良好的吸附性能，只需通过与其他物质复配，能进一步提升石墨相氮化碳的性能，拓宽其在水体处理领域的应用前景。可通过多种方法制得材料，其性能也得到了很大程度的增强，并在工业、农业、光学等多领域广泛应用。

目前，使用 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 与铁离子结合对水中铬的去除还处于研究的初级阶段，因此，本实验采用尿素的溶解析出原理制备了 $\text{Fe-g-C}_3\text{N}_4$ 并模拟了对水体中铬的光催化降解实验。

2. 实验部分

2.1. 光催化材料与拟废水溶液的制备

2.1.1. 尿素铁溶液的准备

用电子分析天平称取 20 g 尿素并研磨成粉末缓慢加入至烧杯中，再按照不同的比例称取一定量的三氯化铁加入到同一烧杯中，用 50 mL 的移液管分两次量取 100 mL 九五乙醇倒入该烧杯中，然后用玻璃棒稍微搅拌至均匀后，再将其置于磁力搅拌器中搅拌并加入至 75℃ 左右，直至固体药品完全溶解且无气泡，此时溶液一般呈现淡黄色或红色，由此即可制得尿素铁溶液，至溶液冷却至室温结晶便得到尿素铁前驱体，尿素铁溶液冷却结晶析出情况见图 2，再将结晶物直接烘干后研磨装管备用。

2.1.2. $\text{Fe-g-C}_3\text{N}_4$ 材料的制备

将经干燥研磨后的尿素铁前驱体装入瓷舟或坩埚中，并用锡纸紧密包裹，将包裹好的尿素铁前驱体按照正确操作放置于管式炉中，设置好升温程序系列数值，在 540℃ 高温焙烧结束后，撕掉锡纸，取出金属铁掺杂的石墨相氮化碳 $\text{Fe-g-C}_3\text{N}_4$ ，其颜色呈微黄色，形状呈粉末状，将其挂取下来研磨备用。具体制备 $\text{Fe-g-C}_3\text{N}_4$ 基本流程见图 3。

2.1.3. 不同比例 Fe 含量材料的制备

为验证 Fe 含量对 $\text{Fe-g-C}_3\text{N}_4$ 的光催化性能的影响，分别按照 FeCl_3 与尿素的质量比为 1:20、2:20、3:20，

温度和其他条件均不变, 分别得到 Fe 掺杂质量 1 g 的 a-Fe-g-C₃N₄、Fe 掺杂质量 2 g 的 b-Fe-g-C₃N₄ 和 Fe 掺杂质量 3 g 的 c-Fe-g-C₃N₄, 对 Fe 含量在的 Fe-g-C₃N₄ 光催化过程中是否有影响做性能测试。

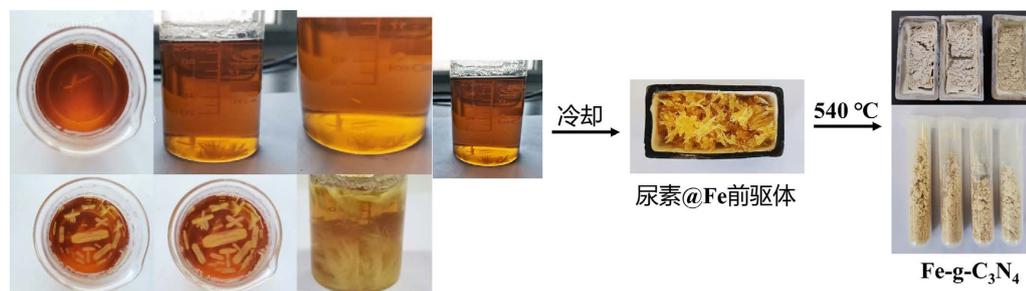


Figure 2. Urea@FeCl₃ solution precipitation crystallization process and material preparation
图 2. 尿素@FeCl₃ 溶液析出结晶过程及材料制备实物图

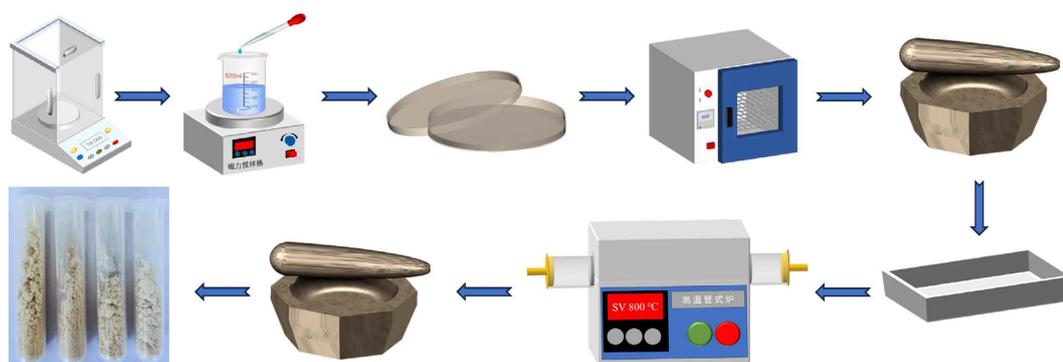


Figure 3. Basic flow diagram for preparing Fe-g-C₃N₄
图 3. 制备 Fe-g-C₃N₄ 的基本流程图

2.1.4. 拟废水溶液的配制

本文中含铬拟废水溶液的配制标准, 依据中华人民共和国生态环境部于 1987 年发布的《水质·六价铬的测定·二苯基碳酰二肼分光光度法》(GB-7467-87)。

准确称取重铬酸钾(K₂Cr₂O₇, AR)固体 0.2829 g, 使用去离子水溶解后, 移入至体积为 1 L 的容量瓶中, 再用去离子水定容至刻度线, 摇匀后静置。此时, 配制的溶液为 1 mL 含有 0.10 mg Cr(VI)。此溶液应现用现配, 并避光放置。再移取 500 mL 重铬酸钾溶液贮备液于 1 L 的容量瓶中, 用去离子水定容至刻度线, 摇匀后静置。此时, 1 mL 溶液中含有 50 μg Cr(VI) (即浓度为 50 mg·L⁻¹ 重铬酸钾模拟废液)。使用当天现用现配。

2.1.5. 指示剂溶液的配制

称取 0.2 g 的二苯基碳酰二肼, 溶于 50 mL 丙酮, 加水稀释至 100 mL, 移入棕色瓶中, 低温避光保存。同时, 还需要配制 0.2 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 溶液, 应移取 2 mL 95%~98%的(浓度为 18.4 mol·L⁻¹)硫酸, 稀释至 200 mL, 此时即为 0.2 mol·L⁻¹ 稀硫酸溶液。

2.2. 光催化实验设计

2.2.1. (a/b/c)Fe-g-C₃N₄ 对光催化性能影响的实验设计

依据控制变量法, 对温度为 25°C、浓度为 50 mg·L⁻¹ 和同一 pH 下的重铬酸钾溶液进行含铁量不同的 a-Fe-g-C₃N₄、b-Fe-g-C₃N₄、c-Fe-g-C₃N₄ 的光催化降解实验。准备 3 个完全干燥的锥形瓶, 分别贴上标签为 a-Fe-g-C₃N₄、b-Fe-g-C₃N₄、c-Fe-g-C₃N₄。用移液管分别量取 50 mL、50 mg·L⁻¹ 的重铬酸钾溶液, 再用

电子天平将制备好的 a-Fe-g-C₃N₄、b-Fe-g-C₃N₄、c-Fe-g-C₃N₄ 分别称取 0.5 g 放入锥形瓶中，pH 均调为最适 pH 的情况下，搅拌均匀，将其放入恒温水浴氙灯下，温度设定为 25℃，反应时长 120 min，每隔 20 min 用针筒取反应液 1 mL 添至 10 mL 的比色管中，与 0.2 mL 的指示剂和 9 mL、0.2 mol·L⁻¹ 的 H₂SO₄ 溶液混合摇匀，静置 5 min 测吸光度。

2.2.2. 不同 pH 值对光催化性能影响的实验设计

依据控制变量法，对温度为 25℃、浓度为 50 mg·L⁻¹ 的重铬酸钾溶液和含铁量相同的(a/b/c)Fe-g-C₃N₄ 进行不同 pH 的光催化降解实验。准备 4 个完全干燥的锥形瓶，分别贴上标签为 pH = 1、pH = 3、pH = 5、pH = 7。用移液管分别量取 50 mL、50 mg·L⁻¹ 的重铬酸钾溶液，再用电子天平将制备好的(a/b/c)Fe-g-C₃N₄ 分别称取 0.5 g 加至锥形瓶中，搅拌均匀，将其放入恒温水浴氙灯下，温度设定为 25℃，反应时长 120 min，每隔 20 min 用针筒取反应液 1 mL 添至 10 mL 的比色管中，与 0.2 mL 的指示剂和 9 mL、0.2 mg·L⁻¹ 的 H₂SO₄ 溶液混合摇匀，静置 5 min 后测吸光度。

2.2.3. 不同光催化剂用量对光催化性能影响的实验设计

依据控制变量法，对温度为 25℃、浓度为 50 mg·L⁻¹ 和同一 pH 下的重铬酸钾溶液进行不同光催化剂用量的光催化降解实验。准备 5 个完全干燥的锥形瓶，分别贴上标签为 0.5 g、1 g、1.5 g、2 g、2.5 g。用移液管分别量取 50 mL、50 mg·L⁻¹ 的重铬酸钾溶液，再用电子天平将制备好的含铁量相同的(a/b/c)Fe-g-C₃N₄ 分别称取对应的质量放入锥形瓶中，pH 均调为最适 pH 的情况下，搅拌均匀，将其放入恒温水浴氙灯下，温度设定为 25℃，反应时长 120 min，每隔 20 min 用针筒取反应液 1 mL 添至 10 mL 的比色管中，与 0.2 mL 的指示剂和 9 mL、0.2 mol·L⁻¹ 的 H₂SO₄ 溶液混合摇匀，静置 5 min 后测吸光度。

3. 结果与分析

3.1. 合成材料的光催化性能探究

本实验旨在探究合成 Fe 掺杂的氮化碳材料有效降解含铬废水，通过光催化降解 Cr(VI)以测试复合材料的性能。设计实验分别探究了不同比例 Fe 含量的 CN、光催化剂的不同添加量以及不同 pH 对 Fe-g-C₃N₄ 光催化降解 Cr(VI)降解规律。

1) (a/b/c)Fe-g-C₃N₄ 对光催化性能的影响

分别将 Fe 掺杂质量 1 g 的 a-Fe-g-C₃N₄、Fe 掺杂质量 2 g 的 b-Fe-g-C₃N₄ 和 Fe 掺杂质量 3 g 的 c-Fe-g-C₃N₄ 的光催化剂加入至拟废水溶液进行光催化性能探究实验。实验完成并将数据处理比后发现，并不是加的铁越多，合成材料的光催化性能越好。在 3 组实验中，m_{Fe} = 2 g 时，降解效果较好。

2) 不同 pH 值对光催化性能的影响

分别将铁掺杂含量 m = 2 g 的 b-Fe-g-C₃N₄ 各称取 0.5 g 加入至 pH = 1、pH = 3、pH = 5 和 pH = 7 的拟废水溶液中进行光催化性能探究实验。实验发现，该光催化过程虽然需要 H⁺，但并不是 pH 值越小，合成材料的光催化性能越好，在 4 组实验中，pH = 3 时，降解效果较好。

3) 光催化剂不同用量对光催化性能的影响

分别将 m = 0.5 g、m = 1 g、m = 1.5 g、m = 2 g、m = 2.5 g 的 b-Fe-g-C₃N₄ 加入至 pH = 3 的拟废水溶液中进行光催化性能探究实验。实验发现，在等体积的拟废水溶液中，并不是光催化剂添加的越多，光催化性能越好。虽然降解程度相近，但 m = 1.5 g 时降解效果较好。

3.2. 实验数据分析

通过配制一系列浓度梯度的重铬酸钾拟废水溶液，测量吸光度并绘制标准曲线，如图 4 所示，得到

$Y = 0.01962X + 0.527$, Y 即吸光度, 斜率 $K = 0.01962$, 截距 $b = 0.527$ 。该标准曲线可求降解实验中铬变化的浓度。

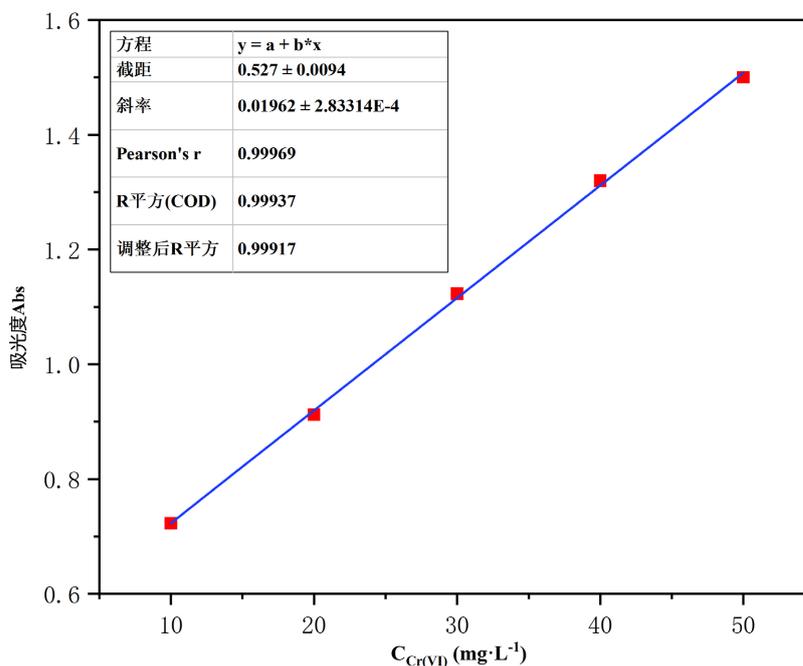


Figure 4. Standard curve of pseudo-wastewater solution of potassium dichromate

图 4. 重铬酸钾拟废水溶液标准曲线

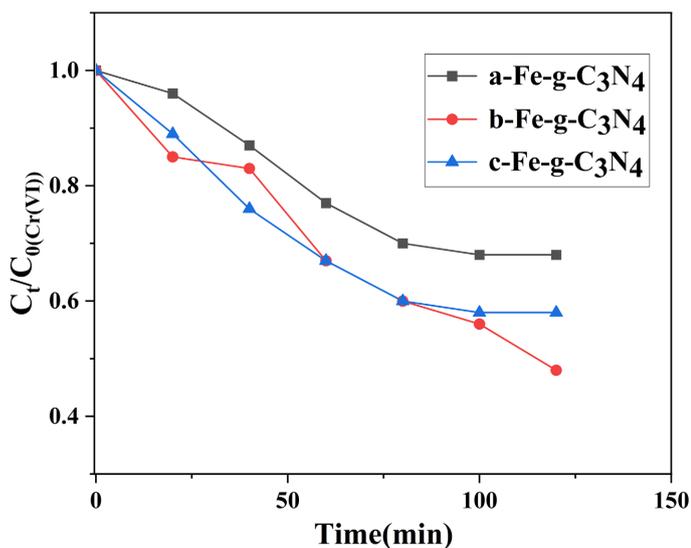


Figure 5. (a/b/c) curve of Fe-g-C₃N₄ photocatalytic degradation of Cr(VI)

图 5. (a/b/c)Fe-g-C₃N₄ 光催化降解 Cr(VI) 曲线

通过图 5 可发现, 掺杂过程中的掺杂比会影响光催化剂的光催化性能, 就设计的 3 组实验中, 掺杂时当 $m_{Fe} = 2$ g 时, 在相同的反应时间, 其光催化性能较好。

通过图 6 可发现, 溶液的 pH 会影响光催化过程, 就设计的 4 组实验中, $pH = 3$ 时, 在相同的反应时间, 其光催化性能较好。

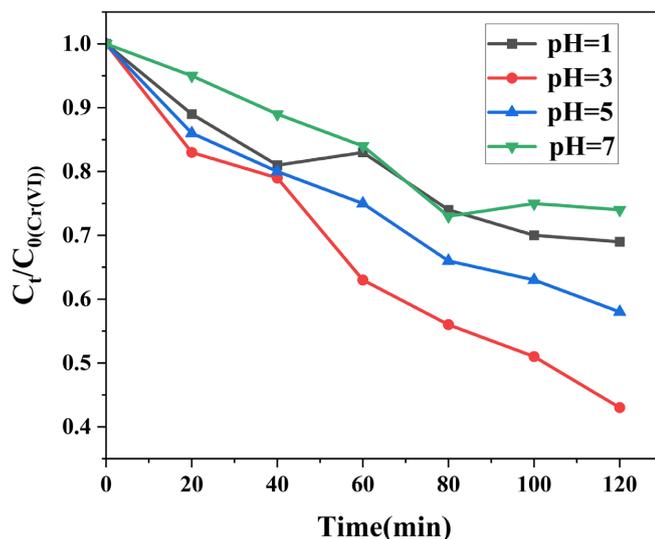


Figure 6. Curves of Cr(VI) photocatalytic degradation at pH = 1, pH = 3, pH = 5 and pH = 7
图 6. pH = 1、pH = 3、pH = 5 和 pH = 7 的光催化降解 Cr(VI) 曲线

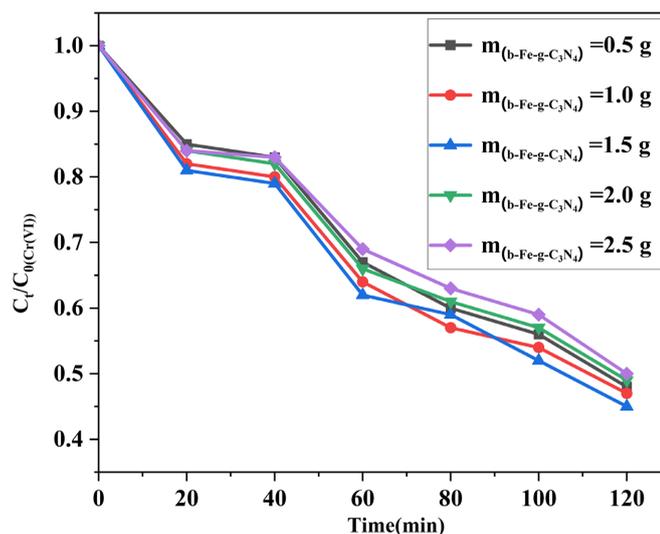


Figure 7. Curves of b-Fe-g-C₃N₄ photocatalytic degradation of Cr(VI) with m = 0.5 g, m = 1 g, m = 1.5 g, m = 2 g, m = 2.5 g
图 7. m = 0.5 g、m = 1 g、m = 1.5 g、m = 2 g、m = 2.5 g 的 b-Fe-g-C₃N₄ 光催化降解 Cr(VI) 曲线

通过图 7 可发现, 同一种类型的光催化剂的不同添加量会影响光催化过程, 就设计的 5 组实验中, m = 1.5 g 时, 在相同的反应时间, 其光催化性能较好。

4. 研究结论

本实验的目的旨在纳米 Fe-g-C₃N₄ 的制备及其光催化降解 Cr(VI) 的性能研究, 经过查阅相关资料, 设计不同的实验, 就 Fe-g-C₃N₄ 光催化剂的合成与探究一系列可能影响光催化剂光催化性能的因素以及影响规律开展。实验的具体结论如下:

1) 借助溶解析出原理合成尿素铁前驱体, 并在高温焙烧后得到淡黄色的纳米 Fe-g-C₃N₄, 同部分研究中相比, 有效地降低了合成光催化剂的成本, 将原料三聚氰胺换为尿素, 缩短了完成实验的时间, 简化了合成步骤以及对实验的设计思路有了进一步的认识。

2) (a/b/c)Fe-g-C₃N₄ 对光催化性能的影响规律为并不是掺杂的铁越多, 合成材料的光催化性能越好。在 3 组实验中, $m_{Fe} = 2 \text{ g}$ 时, 降解效果较好。但由于铁掺杂概率的随机性以及最佳实验条件的探究尚不完全、操作问题等都会对实验造成一定的影响, 故需要进行精确的表征来证实影响该实验现象的机理。

3) 在进行光催化过程中虽然需要 H⁺, 但并不是 pH 值越小, 合成材料的光催化性能越好, 在 4 组实验中, pH = 3 时, 降解效果较好。

4) 在等体积的拟废水溶液中, 并不是光催化剂添加的越多, 光催化性能越好。虽然降解程度相近, 但 $m = 1.5 \text{ g}$ 时降解效果较好。

基金项目

绿色催化剂 Fe-g-C₃N₄ 降解水中污染物, 国家级大学生创新训练计划项目(项目编号: 202310764009), 2023-2024。

参考文献

- [1] (2023) Don't Wait for COP: The End of the Fossil-Fuel Age Must Start Now. *Nature*, **613**, 216-216.
- [2] Höök, M. and Tang, X. (2013) Depletion of Fossil Fuels and Anthropogenic Climate Change—A Review. *Energy Policy*, **52**, 797-809. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>
- [3] Zhu, Y., Lv, C., Yin, Z., Ren, J., Yang, X., Dong, C., et al. (2019) A [001]-Oriented Hittorf's Phosphorus Nanorods/Polymeric Carbon Nitride Heterostructure for Boosting Wide-Spectrum-Responsive Photocatalytic Hydrogen Evolution from Pure Water. *Angewandte Chemie International Edition*, **59**, 868-873. <https://doi.org/10.1002/anie.201911503>
- [4] Burke, P.J. (2023) On the Way Out: Government Revenues from Fossil Fuels in Australia. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, **67**, 1-17. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12503>
- [5] Ballal, V., Cavalett, O., Cherubini, F. and Watanabe, M.D.B. (2023) Climate Change Impacts of E-Fuels for Aviation in Europe under Present-Day Conditions and Future Policy Scenarios. *Fuel*, **338**, Article ID: 127316. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127316>
- [6] Houas, A. (2001) Photocatalytic Degradation Pathway of Methylene Blue in Water. *Applied Catalysis B: Environmental*, **31**, 145-157. [https://doi.org/10.1016/s0926-3373\(00\)00276-9](https://doi.org/10.1016/s0926-3373(00)00276-9)
- [7] 杭子清. 简析光催化技术及其研究现状[J]. 资源节约与环保, 2021(2): 122-123.
- [8] 何晓东, 田桃桃, 刘雪芳, 张秋爽, 等. 可持续发展理念下的水能源治理措施——基于化工角度治污的综合分析[J]. 可持续能源, 2022, 12(5): 29-39.
- [9] 张建广, 陈全, 田路萍, 等. 环境友好型土壤重金属修复技术及其应用[J]. 材料导报, 2023, 37(5): 195-205.
- [10] 尹贞, 张钧超, 廖书林, 马强, 王庆国, 张进锋. 铬污染场地修复技术研究及应用[J]. 环境工程, 2015, 33(1): 159-162.
- [11] 容群, 罗栋源, 边鹏洋, 等. 土壤中铬的迁移转化研究进展[J]. 四川环境, 2018, 37(2): 156-160.
- [12] Phanichphant, S., Nakaruk, A., Chansaenpak, K. and Channei, D. (2019) Evaluating the Photocatalytic Efficiency of the BiVO₄/rGO Photocatalyst. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 16091. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52589-5>
- [13] Ünlü, B., Çakar, S. and Özacar, M. (2018) The Effects of Metal Doped TiO₂ and Dithizone-Metal Complexes on DSSCs Performance. *Solar Energy*, **166**, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.064>
- [14] 水博阳, 宋小三, 范文江. 光催化技术在水处理中的研究进展及挑战[J]. 化工进展, 2021, 40(S2): 356-363.
- [15] 丁蕾. 基于石墨相氮化碳纳米复合材料的合成及其光催化性能研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2023.
- [16] Polat, O. and Sahiner, N. (2022) Recent Development in Solar-Driven Photocatalytic Hydrogen Production Utilizing g-C₃N₄. *International Journal of Energy Research*, **46**, 14587-14608. <https://doi.org/10.1002/er.8181>
- [17] Thiruvengkatachari, R., Vigneswaran, S. and Moon, I.S. (2008) A Review on UV/TiO₂ Photocatalytic Oxidation Process (Journal Review). *Korean Journal of Chemical Engineering*, **25**, 64-72. <https://doi.org/10.1007/s11814-008-0011-8>
- [18] Mishra, N., Reddy, R., Kuila, A., Rani, A., Nawaz, A. and Pichiah, S. (2017) A Review on Advanced Oxidation Processes for Effective Water Treatment. *Current World Environment*, **12**, 469-489. <https://doi.org/10.12944/cwe.12.3.02>
- [19] 蒋梦, 姚昱岑, 徐士官, 等. 石墨相氮化碳基光催化剂研究进展[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2024, 37(1): 87-92.