

中空三维 rGO/P-HC/TiO₂ 复合材料 光催化降解氨氮

王 敏¹ 夏立新² 林清娴¹

(1.厦门市建筑科学研究院有限公司 福建 厦门 361004; 2.垒智设计集团有限公司 福建 厦门 361004)

摘 要: 采用水热法制备了一系列能够降解水体中氨氮的催化剂,通过 SEM、XRD、BET 和 UV-vis-DRS 光谱技术对催化剂材料的表面性质进行了表征,研究了 HC、P-HC、rGO/P-HC、TiO₂、P-HC/TiO₂、rGO/TiO₂ 和 rGO/P-HC/TiO₂ 的光催化性能,探讨催化剂用量、溶液 pH 值和氨氮浓度对氨氮降解过程的影响。研究发现,氨氮去除率随着催化剂用量的增加先升高后降低,在 pH=8 时氨氮去除率最高。rGO/P-HC/TiO₂ 催化剂对氨氮降解的光催化活性明显高于其他催化剂,氨氮去除率达到 93.0%,在循环利用试验中,rGO/P-HC/TiO₂ 在紫外线和阳光下氨氮氧化反应中表现出良好的循环活性和稳定性。所制备的催化剂具有良好的应用前景。

关键词: 二氧化钛; rGO; 光催化; 吸附; 氨氮

中图分类号: TF823, TB33

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2020)06-0045-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Hollow 3D rGO/P-HC/TiO₂ for Photocatalytic Degradation of Ammonia Nitrogen

Wang Min¹, Xia Lixin², Lin Qingxian¹

(1.Xiamen Academic of Building Research Co., Ltd., Xiamen 361004, Fujian, China; 2.LETS Design Group Co., Ltd., Xiamen 361004, Fujian, China)

Abstract: In this work, a series of catalyst were successfully fabricated via hydrothermal method, which were used as efficient UV light photocatalytic degradation of ammonia nitrogen from aqueous solution. The surface properties of the catalysts were characterized by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), the Brunauer-Emmett-Teller (BET) method and UV-vis-DRS spectroscopy (DRS) technique. The comparison of photocatalytic performance among HC, P-HC, rGO/P-HC, TiO₂, P-HC/TiO₂, rGO/TiO₂ and rGO/P-HC/TiO₂ was carried out. The influences of the dosage of catalyst, the solution pH and ammonia nitrogen concentration on the degradation process were also investigated. It is shown that the ammonia nitrogen removal rate first increases and then decreases with the increase of catalyst dosage. And the removal rate reaches the highest at pH=8. The as-prepared rGO/P-HC/TiO₂ catalyst shows a much higher photocatalytic activity for degradation of ammonia nitrogen than other catalysts, with the removal efficiency reached 93.0%. In cycle availability experiments, the rGO/P-HC/TiO₂ exhibits outstanding recycle activity and stability in ammonia nitrogen oxidation reaction under UV and sun light. The prepared catalysts are promising for the degradation of ammonia nitrogen from water resource.

Key words: TiO₂, rGO, photocatalytic, adsorption, ammonia nitrogen

收稿日期: 2020-09-15

作者简介: 王 敏(1993—), 男, 湖北黄冈人, 汉族, 硕士, 主要研究方向为水处理技术, E-mail: minwang9308@163.com。

0 引言

随着工农业的快速发展,氮氮污染正成为一个主要的水环境污染问题。氮氮的形态包括 NH_4^+ 和 NH_3 。当氮被细菌氧化为亚硝酸盐和硝酸盐时,水中的溶解氧会急剧下降,从而引起河流、湖泊等水体的富营养^[1]。此外,氮氮的存在会降低水处理过程中的净化效率,如氯化作用。近年来,高级氧化法(AOPs)已成为去除水中污染物的一种有吸引力的方法。特别是,光催化剂在紫外光或可见光的激发下,会产生各种具有强氧化性的自由基产物($\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$ 等),进而降解水中的污染物^[2-3]。Altomare 等通过沉积法制备不同贵金属掺杂的二氧化钛催化剂,研究表明,贵金属能很好地分离电子空穴对,从而提高空穴的氧化反应速率,促进氮氮的降低^[4]。Guo 等^[5]采用溶胶-凝胶法将 TiO_2 负载于碳纳米管上,通过研究催化剂用量、氮氮初始浓度、pH 和 H_2O_2 用量等因素对海水养殖氮氮废水降解过程的影响,在最佳条件下氮氮降解率可达 75.78%。王英伟等^[6]制备以活性炭负载(TiO_2/AC)、吐温 80、 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 掺杂的四种纳米 TiO_2 颗粒复合材料,对氮氮光催化作用比较,其性能依次是 $\text{TiO}_2/\text{AC} > \text{Fe}^{3+}/\text{吐温}/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Cu}^{2+}/\text{吐温}/\text{TiO}_2 > \text{Fe}^{3+}/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Cu}^{2+}/\text{TiO}_2$ 。同时掺杂 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 对二氧化钛光催化效率具有协同效应,但去除氮氮效率均不高,原因是所制备的材料比表面积不大且未能很好地利用 TiO_2 的光催化作用,因此,要寻找比表面积大且能够有效降低 TiO_2 带隙能并有效分离电子-空穴对的复合材料。笔者制备了满足以上两点要求的 $\text{rGO}/\text{P-HC}/\text{TiO}_2$ 复合材料,并考察了其去除氮氮的效果。

1 试验部分

1.1 仪器与试剂

扫描电子显微镜(SEM,日本东京日立公司);X射线衍射(XRD,荷兰帕纳科公司);ASAP2460型比表面仪(BET,美国麦克公司);UV-2600型紫外可见分光光度计(UV-Vis,日本岛津公司);AVATAR 360型傅里叶红外线光谱分析仪(FT-IR,美国麦迪逊公司)。

磷酸;氯化钠;碘化钾;二甲亚砜;酒石酸钾钠;钛酸四丁酯;冰醋酸; N,N,N',N' -四甲基乙二胺;乙醇;均购于国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 磷酸活化生物质炭(P-HC)的制备

以汉麻杆为生物质炭前驱体,用粉碎机将汉麻杆粉碎成小颗粒然后用去离子水和乙醇洗涤,在 80°C 烘箱中干燥 6 h,然后将烘干的汉麻杆置于 600°C 氮气保护的管式炉中煅烧 2 h 得到 HC。采用 H_3PO_4 溶液直接活化法制备 P-HC。

1.2.2 还原氧化石墨烯/磷酸活化生物质炭(rGO/P-HC)的制备

将 30.3 mg 氧化石墨烯(GO)溶解在 25 mL 去离子水中并超声处理 2 h 得到 GO 均匀悬浮液,然后 10 g P-HC 加入到上述悬浮液中并磁力搅拌 2 h,将悬浮液中多余的水利用油浴蒸发后在 600°C 管式炉中氮气保护下煅烧 2 h。煅烧产物用水和乙醇分别清洗三次,清洗后的产品在 120°C 烘箱中干燥 30 h,得到 $\text{rGO}/\text{P-HC}$ 。

1.2.3 还原氧化石墨烯/磷酸活化生物质炭/二氧化钛(rGO/P-HC/ TiO_2)的制备

采用简易水热法制备 $\text{rGO}/\text{P-HC}/\text{TiO}_2$ 。具体步骤如下:50 mg $\text{rGO}/\text{P-HC}$ 加入到 60 mL 的冰醋酸中并磁力搅拌 10 min。4 mL N,N,N',N' -四甲基乙二胺、4 mL 二甲亚砜和 4 mL 钛酸四丁酯逐滴加入到上述溶液中并磁力搅拌 30 min。然后将获得的悬浮液转移到 100 mL 反应釜中,置于 140°C 烘箱中水热反应 13 h。通过过滤、乙醇洗涤 3 次后在 100°C 烘箱中干燥 5 h 得到 $\text{rGO}/\text{P-HC}/\text{TiO}_2$,制备过程如图 1 所示。同样,采用相同的方法制备纯 TiO_2 粉末、 rGO/TiO_2 和 $\text{P-HC}/\text{TiO}_2$ 。

1.3 吸附试验

为确定复合材料的吸附能力,在光催化降解前进行水浴试验。取 50 mg 样品置于烧杯中,随后加入 50 mL 浓度为 50 mg/L 氯化铵溶液,在黑暗恒温箱中 25°C 条件下震荡 6 h。吸附平衡后,采用 $0.22\ \mu\text{m}$ 过滤膜对吸附后的溶液进行固液分离^[7],用纳氏试剂分光光度法测定溶液氮氮浓度,试验在相同的条件下重复三次。根据公式(1)计算氮氮去除率 R :

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中 R 为氮氮的去除效率,%; C_0 是氮氮溶液的初始浓度,mg/L; C_e 是氮氮溶液在 t 时刻的浓度,mg/L。

1.4 光催化降解试验

取 50 mg 样品置于烧杯中,随后加入 50 mL 浓度为 50 mg/L 氯化铵溶液。首先,在黑暗中搅拌吸附 30 min 达到吸附平衡后,在 25 W 的紫外光条件

下,继续光催化降解氨氮 180 min。在光催化降解试验过程中,在选定的时间间隔测定氨氮溶液浓度,在相同的条件下重复三次。由式(1)计算去除效率。

2 结果与讨论

2.1 表征分析

图 2 为复合材料的 SEM 图。HC 材料本身具有

丰富的微孔结构,为催化剂的负载提供有利条件。通道中的有机化合物和半纤维素在煅烧过程中被分解,形成中空三维结构,直径在 10~100 μm。图 2(c) 中 TiO₂ 颗粒密集均匀地分布在 HC 表面,图 2(d) 能够明显看出二氧化钛呈花状且粒子直径约 2~5 μm,负载在 rGO/P-HC 上的 TiO₂ 会增加异质结的数量,有利于光催化反应的进行。

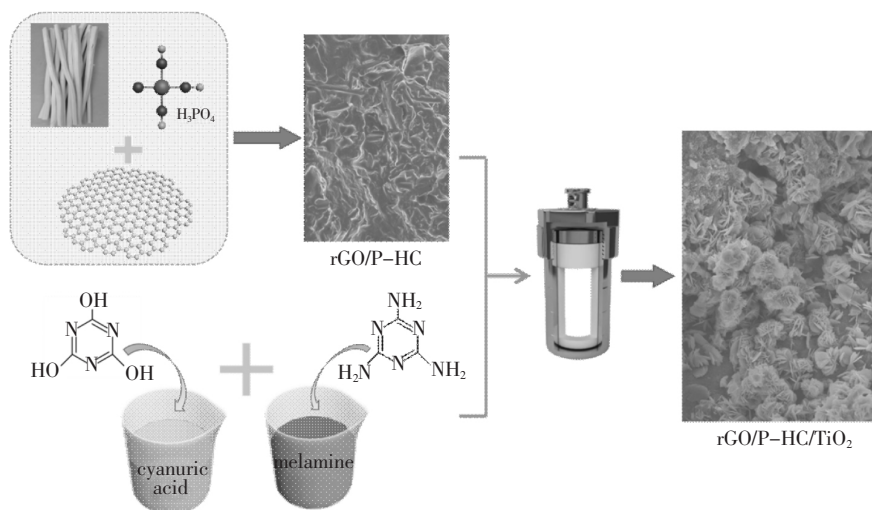


图 1 rGO/P-HC/TiO₂ 制备示意

Fig.1 Schematic illustration of the synthesis process of rGO/P-HC/TiO₂

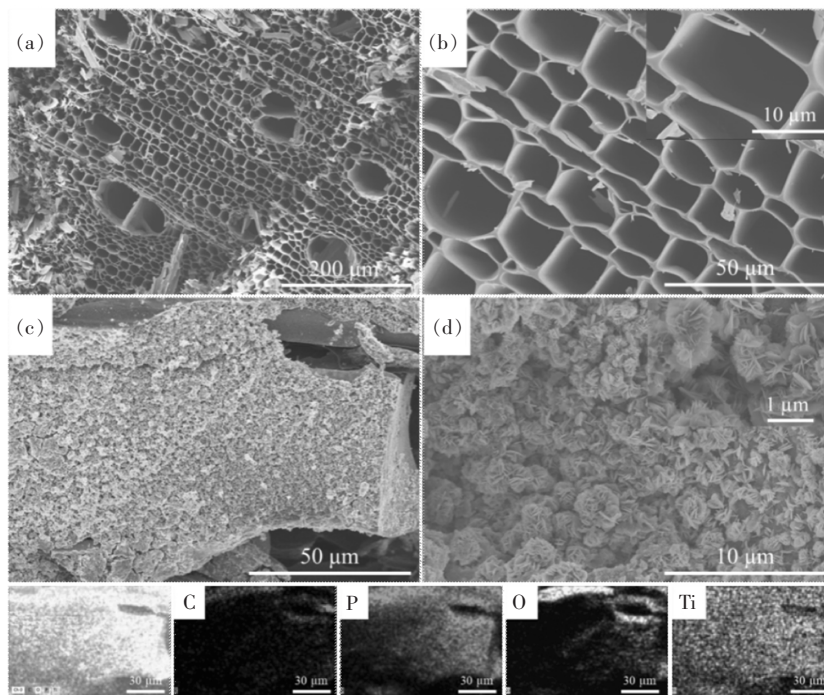


图 2 (a, b) HC、(c, d) rGO/P-HC/TiO₂ 的扫描电镜形貌

Fig.2 SEM and mapping of (a, b) HC and (c, d) rGO/P-HC/TiO₂

利用 XRD 分析了 P-HC、rGO/P-HC、rGO/P-HC/TiO₂、P-HC/TiO₂ 和 rGO/TiO₂ 的组成和结晶度 图谱如图 3 所示。在 $2\theta=23^\circ$ 左右时 P-HC、rGO/P-HC、rGO/P-HC/TiO₂ 和 P-HC/TiO₂ 均出现碳特征衍射峰^[8]。rGO/P-HC/TiO₂、P-HC/TiO₂ 和 rGO/TiO₂ 复合材料表现出相似的二氧化钛锐钛矿特征峰 峰值在 $2\theta=37.2^\circ$ 、 47.0° 、 52.9° 、 53.7° 和 61.4° 时分别对应(004)、(200)、(105)、(211)和(204)晶面的锐钛矿二氧化钛(JCPDS 21-1272)。另外 rGO/P-HC/TiO₂、P-HC/TiO₂ 和 rGO/TiO₂ 的晶格面呈现高度的晶体化,衍射峰较强,没有其他杂峰,有利于后续的光催化降解。与 P-HC/TiO₂ 相比, rGO/P-HC/TiO₂ 的衍射峰明显向右偏,这是因为由于 rGO 的引入,导致晶面和形貌结构发生了轻微的变化。XRD 结果表明 rGO 和 P-HC 与 TiO₂ 成功结合。

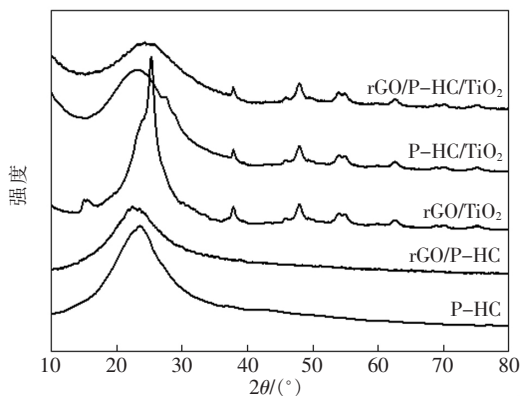


图3 P-HC、rGO/P-HC、rGO/P-HC/TiO₂、P-HC/TiO₂ 和 rGO/TiO₂ 复合材料 X 射线衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of P-HC, rGO/P-HC, rGO/P-HC/TiO₂, P-HC/TiO₂ and rGO/TiO₂

表 1 为复合材料的孔隙特性分析结果。HC、P-HC、rGO/P-HC、rGO/P-HC/TiO₂、P-HC/TiO₂ 和 rGO/TiO₂ 的比表面积分别为 294.00、385.29、544.63、344.63、321.82、163.47 m²/g,平均孔径分别为 2.20、2.65、3.12、4.04、2.43、4.00 nm。与 HC 相比, P-HC 的比表面积随着磷酸的活化而增大,导致 HC 孔隙结构更发达;随着 rGO 的掺杂,由于 rGO 的高比表面积,使得 rGO/P-HC 的比表面积是 P-HC 的 1.41 倍。一般来说,比表面积越大,提供的活性位点越多, rGO 增强了传质速度,提高了污染物分子的吸附能力,从而提高了光催化降解活性^[9]。

表 1 复合材料的比表面积和孔径特性

Table 1 Specific surface area and pore characteristics of samples

材料	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	平均孔径/nm	孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)
HC	294.00	2.20	0.16
P-HC	385.29	2.65	0.40
rGO/P-HC	544.63	3.12	0.91
rGO/TiO ₂	163.47	4.00	0.17
P-HC/TiO ₂	321.82	2.43	0.32
rGO/P-HC/TiO ₂	344.63	4.04	0.545

2.2 不同材料的氨氮去除率

为了比较复合材料的吸附性能和光催化能力,在紫外光下对氨氮进行了吸附试验和光催化降解,结果如图 4 所示。从图 4 可看出 rGO/P-HC/TiO₂ 对氨氮的去除率最高,达到 93.0%,这是因为 P-HC 和 TiO₂ 的存在,起到吸附和光催化的共同作用,同时 rGO 可以提高光催化降解过程中的电子转移速度。HC、P-HC、rGO/P-HC、TiO₂、P-HC/TiO₂ 和 rGO/TiO₂ 的去除率分别为 20.6%、30.5%、38.1%、43.6%、60.0%和 73.0%。由于 HC 和 P-HC 没有光催化活性,因此在紫外线照射 180 min 的过程中去除率几乎没有变化;P-HC/TiO₂ 和 rGO/TiO₂ 具有较高的比表面积,其微孔表面可增加活性催化位点,在紫外光照射 180 min 后去除率分别达到 60.0%和 73.0%。这是由于在紫外光照射下有足够的活性位点来产生自由基,从而提高了氨氮的降解效率。

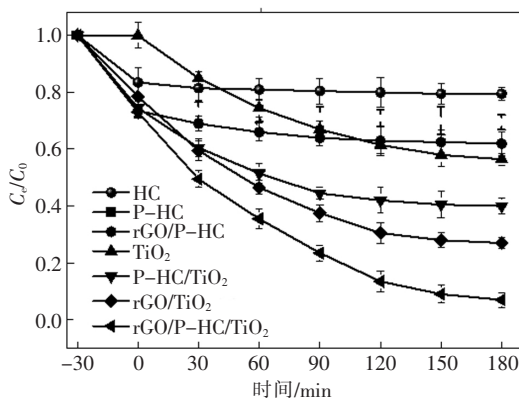


图4 HC、P-HC、rGO/P-HC、TiO₂、P-HC/TiO₂、rGO/TiO₂、rGO/P-HC/TiO₂ 的氨氮去除率

Fig.4 Ammonia nitrogen removal rate by HC, P-HC, rGO/P-HC, TiO₂, P-HC/TiO₂, rGO/TiO₂ and rGO/P-HC/TiO₂

2.3 pH 对氨氮去除率的影响

pH 值在整个光催化降解过程中有着重要的影

响,因为它会同时影响材料的表面电荷和溶液中氨 (NH_3 、 NH_4^+) 的存在形式。为了研究 pH 值在氨氮降解过程中的影响,以 rGO/P-HC/TiO₂ 复合材料为催化剂进行了不同 pH 值(2、5、8、11)的试验研究,结果如图 5 所示。pH=2、5、8 和 11 时,氨氮去除率分别为 77.0%、84.0%、93.0% 和 61.5%。氨氮的去除率开始随着 pH 的增加而增大,在 pH=8 时去除率达到最大值,随后随着 pH 值继续增加而下降。这是由两个因素造成的:① rGO/P-HC/TiO₂ 复合材料表面在酸性条件下呈正电荷,在碱性条件下呈负电荷,在弱碱性条件下,通过静电引力吸附氨氮于 rGO/P-HC/TiO₂ 表面,然后进行光催化降解;② 不同 pH 值对 NH_3 的质子化状况不同,在弱碱性条件下大量铵离子与 OH^- 结合,转化为气体 NH_3 。

2.4 不同催化剂投加量对氨氮去除率的影响

以 rGO/P-HC/TiO₂ 复合材料为催化剂,研究不同投加量对氨氮去除率的影响,结果如图 6 所示,氨氮的去除率依次为 50 mg>25 mg>100 mg>150 mg,在紫外线条件下氨氮去除率分别为 93.5%、85.8%、80.5% 和 69.0%,在太阳光条件下氨氮去除率分别为 50.5%、45.1%、42.6% 和 41.1%。理论上, $\cdot\text{OH}$ 随着催化

剂投加量的增加而增多,从而提高光催化降解效率,但是氨氮去除率在催化剂投加量为 50 mg 时最高,因为过量的催化剂会引起溶液浑浊,阻碍光的穿透,从而降低光催化降解效率。此外,在相同投加量的情况下,紫外线照射比太阳光照射氨氮去除率更高,表明催化剂吸收紫外线区域高于在可见光区域。

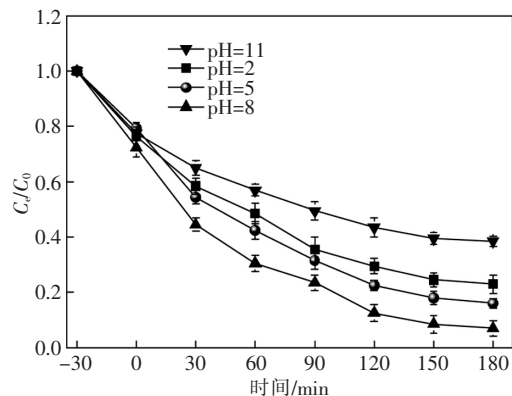


图 5 pH 对氨氮去除率的影响

Fig.5 The influence of pH on ammonia nitrogen removal rate with rGO/P-HC/TiO₂ under UV radiation

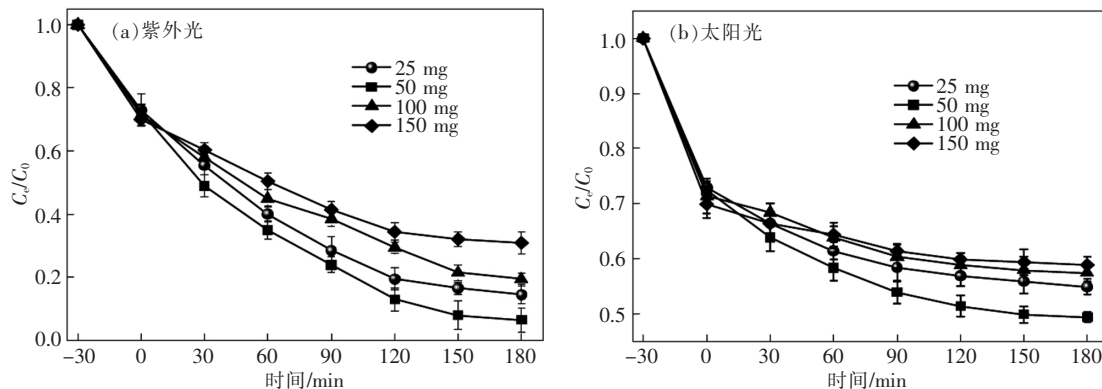


图 6 不同投加量对氨氮去除率的影响

Fig.6 The removal efficiency of ammonia nitrogen under different dosages with rGO/P-HC/TiO₂ in sun light and UV radiation

2.5 循环试验

催化剂循环可用性是非常重要的性能,如图 7 所示,试验表明,循环试验后复合材料 rGO/P-HC/TiO₂ 的光催化活性没有明显降低,回收 1~6 次后氨氮的去除效率在紫外光和太阳光下分别是 93.0%、92.4%、91.5%、90.0%、86.9%、85.1% 以及 49.5%、49%、48.4%、46.4%、44.8%、44%,表明 rGO/P-HC/

TiO₂ 有较好的稳定性。氨氮去除率逐渐降低可能是由于重复降解过程中催化剂的少量丢失。总体来说,在氨氮光催化降解过程中,催化剂的循环利用性能较好。

2.6 氨氮降解机理

在光催化降解氨氮过程中,存在三种自由基活性物质:光生成空穴 (h^+)、超氧阴离子自由基

($\cdot\text{O}_2^-$) 和羟基自由基($\cdot\text{OH}$)。试验中分别添加草酸铵(AO)、苯醌(BQ)和异丙醇(IPA)作为 h^+ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 的自由基清除剂,结果如图8所示。加入不同的自由基清除剂在紫外光照射下会不同程度地降低氨氮去除率,说明 $\cdot\text{OH}$ 、 h^+ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 是光催化降解过程中的自由基活性物质。无清除剂时氨氮去除率为93.5%,添加AO、BQ和IPA时氨氮的去除率分别为40.1%、56.0%和61.5%,说明 h^+ 在氨氮降解过程中起着更重要的作用。

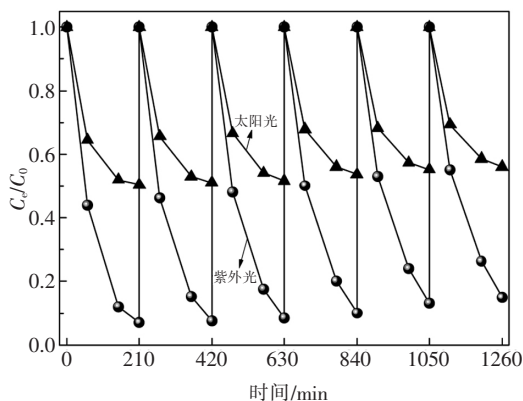


图7 rGO/P-HC/TiO₂ 复合材料的循环利用性和稳定性
Fig.7 The reusing capability and stability of rGO/P-HC/TiO₂

通过猝灭试验,提出了 rGO/P-HC/TiO₂ 催化剂光催化降解氨氮途径(图9)。在光照条件下,光电子激发 TiO₂ 产生电子—空穴对,但由于 TiO₂ 的带隙能较大,只能利用一小部分光能,当 TiO₂ 负载于 rGO/P-HC 表面后, rGO/P-HC/TiO₂ 的带隙能降低至 2.35 eV,光电子能够激发更多的自由基,包括 $\cdot\text{OH}$ 、 h^+ 和 $\cdot\text{O}_2^-$ 。此外,HC 和 rGO 的存在会阻碍电子—空穴对复合。空穴(h^+)能够快速与 H₂O 反应生成 $\cdot\text{OH}$ ^[10]。 $\cdot\text{O}_2$ 与 e^- 结合生成 $\cdot\text{O}_2^-$,然后与 H₂O 进一步反应生成 $\cdot\text{OH}$,是氨氮降解过程中的重要自由基。

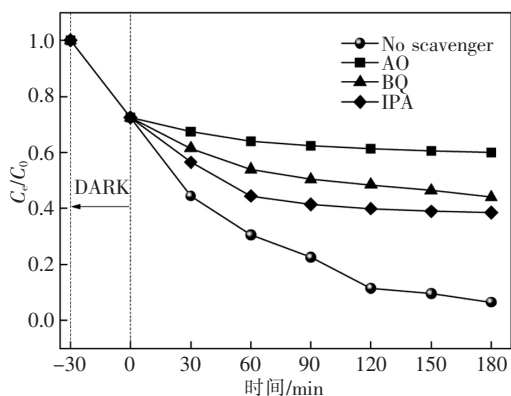


图8 不同自由基清除剂对 rGO/P-HC/TiO₂ 降解氨氮的影响
Fig.8 Influences of different radical scavengers on ammonia nitrogen degradation by rGO/P-HC/TiO₂

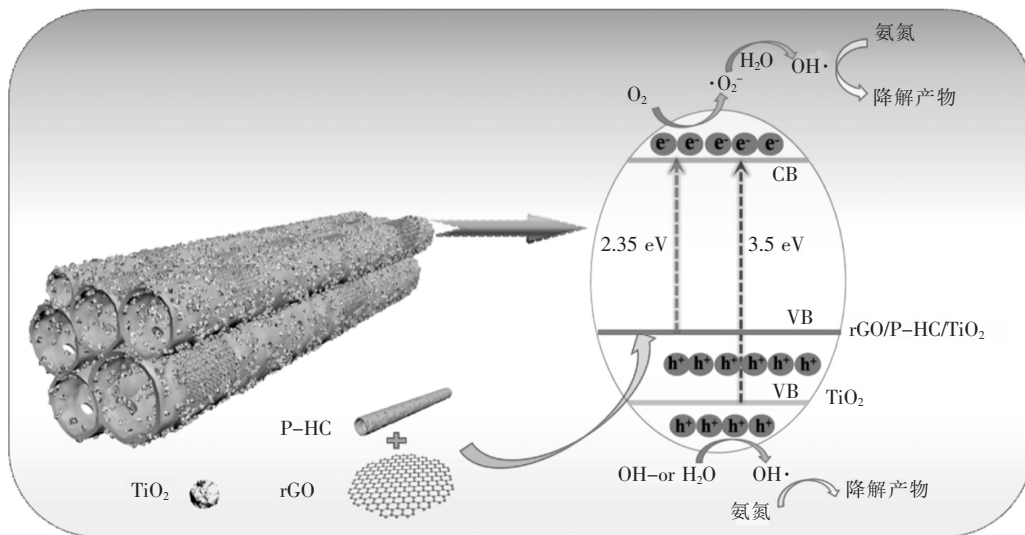


图9 氨氮去除途径示意
Fig.9 Schematic illustration of the proposed mechanisms

3 结论

1) 采用水热法成功制备了 rGO/P-HC/TiO₂ 复

合材料, TiO₂ 能够均匀地负载于 rGO/P-HC 表面, TiO₂ 呈花状且粒子直径约 2~5 μm, rGO 和 P-HC 能够降低复合材料的带隙能,降低电子—空穴对的复

合率, 具有较好的吸附和光催化性能。

2) 氨氮的去除率开始随着 pH 的增加而增大, 在 pH=8 时去除率达到最大值 93.0% 随后随着 pH 值继续增加而下降。

3) 不同催化剂投加量条件下氨氮的去除率依

次为 50 mg>25 mg>100 mg>150 mg, 紫外光下氨氮去除率分别为 93.5%、85.8%、80.5% 和 69.0%。

4) 紫外光下催化剂循环使用 6 次后氨氮去除率为 85.1% 表明 rGO/P-HC/TiO₂ 有较好的稳定性。

参考文献

- [1] Huang Li, Li Liang, Dong Wenbo *et al.* Removal of ammonia by OH radical in aqueous phase [J]. Environmental Science & Technology 2008, 42: 8070–8075.
- [2] Dewil R, Mantzavinos D, Poullos I *et al.* New perspectives for advanced oxidation processes [J]. Journal of Environmental Management 2017, 195: 93–99.
- [3] Sillanpaa A M, Ncibi M C, Matilainen A. Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review [J]. Journal of Environmental Management 2017, 208: 56–76.
- [4] Altomare M, Selli E. Effects of metal nanoparticles deposition on the photocatalytic oxidation of ammonia in TiO₂ aqueous suspensions [J]. Catalysis Today 2013, 209: 127–133.
- [5] Guo M C, Yu X C, Liu J H *et al.* Composite photocatalysts of CNTS-TiO₂: an efficient photocatalyst for the degradation of ammonia nitrogen pollutant in mariculture wastewater under UV light irradiation [J]. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng 2018, 301: 012138.
- [6] Wang Yingwei, Li Yufei. Photocatalytic performance and reaction pathway of TiO₂ composite materials on ammonia and nitrogen degradation in water [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2020, 41(2): 63–68.
(王英伟, 李雨霏. 二氧化钛复合材料光催化水体中氨氮的性能及降解途径 [J]. 钢铁钒钛 2020, 41(2): 63–68.)
- [7] Huo Hanxin, Lin Hai, Dong Yingbo *et al.* Ammonia-nitrogen and phosphates sorption from simulated reclaimed waters by modified clinoptilolite [J]. Journal of Hazardous Materials 2012(229–230): 292–297.
- [8] Zhang Yanhui, Tang Zirong, Fu Xianzhi *et al.* TiO₂-graphene nanocomposites for gas-phase photocatalytic degradation of volatile aromatic pollutant: is TiO₂-graphene truly different from other TiO₂-carbon composite materials [J]. ACS Nano 2010(4): 7303–7314.
- [9] Liu Qiong, Chen Tianxiang, Guo Yarong *et al.* Ultrathin g-C₃N₄ nanosheets coupled with carbon nanodots as 2D/0D composites for efficient photocatalytic H₂ evolution [J]. Applied Catalysis B Environmental 2016, 193: 248–258.
- [10] Hassani A, Khataee A, Karaca S *et al.* Sonocatalytic degradation of ciprofloxacin using synthesized TiO₂ nanoparticles on montmorillonite [J]. Ultrasonics Sonochemistry 2016, 35: 251–262.

编辑 杨冬梅

攀钢两项成果达国际领先水平

(12月16日消息)近日,中国钢铁工业协会在北京组织对攀钢牵头负责的“红格南矿资源综合利用关键技术研究”和“攀西钒资源绿色高效利用关键技术与应用”两个项目进行科技成果评价,评价委员会一致认为,两项目核心技术均达到国际领先水平。

这两个项目的研发汇聚了攀钢和重庆大学等11家科研院、所、校、企的技术力量,项目团队历时10余年,突破了高钛型高炉渣提钛、攀西钛资源熔盐氯化、攀西钒资源绿色高效利用等一系列技术瓶颈,并取得了明显成效。

据了解,“红格南矿资源综合利用关键技术研究”项目研究成果进一步丰富和发展了我国钒钛磁铁矿资源综合利用技术体系,可为红格南矿开发利用提供成熟产业化技术支撑;而“攀西钒资源绿色高效利用关键技术与应用”项目开发形成了攀西钒资源绿色高效利用系统解决方案,并实现产业化应用。

摘自 <https://epaper.scdaily.cn/shtml/scr/20201216/247049.shtml>