

贺志勇, 方志斌, 朱淑维, 等. TiO_2 -AC 的制备及对难降解有机废水光催化反应的试验[J]. 净水技术, 2026, 45(7): 132-137.

He Z Y, Fang Z B, Zhu S W, et al. Preparation of TiO_2 -AC and experiment of photocatalytic recation for non-biodegradable organic wastewater[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(7): 132-137.

TiO_2 -AC 的制备及对难降解有机废水光催化反应的试验

贺志勇, 方志斌*, 朱淑维, 汤 恕, 徐 征

(湖南湘牛环保实业有限公司, 湖南长沙 410017)

摘 要 【目的】 文章目的是探究活性炭与 TiO_2 制备的复合催化剂对难降解有机废水的处理效果。【方法】 采用浸渍法将商用锐钛型纳米 TiO_2 负载在煤质活性炭上, 分别制备了柱状催化剂 TiO_2 -AC-Z, 粉状催化剂 TiO_2 -AC-F。试验以某新材料企业生产线上经稀释后的蒸发结晶产生的废水为考察对象, 通过试验比较不同催化剂体系下废水中化学需氧量(COD)和色度的去除效果; 同时考察了反应时间、催化剂投加量、废水 pH、紫外灯照射方式及原废水中 Cl^- 质量浓度对光催化反应效率的影响。【结果】 所制得的催化剂均对该类废水有一定的处理效果, 其中粉状催化剂 TiO_2 -AC-F 对稀释后的蒸发结晶母液中的 COD 和色度去除效果最佳, 在 pH 值为 7, 催化剂投加量为 3 g/L, 反应 120 min 时达到最佳反应效果, COD 去除率可达 57.3%, 色度去除率可达 98.33%。紫外灯浸没照射更有利于光催化反应体系, 在 120 min 时的 COD 去除率可达 77.66%, 比悬挂照射的高 20.36%。同时发现原水 Cl^- 质量浓度的增加, 会导致光催化体系内 COD 的去除率不断降低, 且 Cl^- 质量浓度越高影响越大。【结论】 认为活性炭与 TiO_2 结合后, 可利用活性炭的大比表面积和良好的吸附性能, 提高催化剂对污染物的吸附能力, 从而增加光催化反应的有效接触面积, 有利于富集降解有机污染物。该成果可为光催化氧化技术在难降解有机废水处理中的运用提供参考。

关键词 光催化; TiO_2 ; 活性炭; 催化剂; 有机废水

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)07-0132-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.07.015

Preparation of TiO_2 -AC and Experiment of Photocatalytic Reaction for Non-Biodegradable Organic Wastewater

He Zhiyong, Fang Zhibin*, Zhu Shuwei, Tang Shu, Xu Zheng

(Hunan Xiangniu Environmental Protection Industry Co., Ltd., Changsha 410017, China)

Abstract [Objective] The purpose of this paper is to explore the effect of composite catalyst prepared by activated carbon and TiO_2 on the treatment of refractory organic wastewater. [Methods] Commercial anatase nano- TiO_2 was loaded on coal based activated carbon by impregnation method, and the columnar catalyst TiO_2 -AC-Z and powder catalyst TiO_2 -AC-F were prepared respectively. The experiment took the diluted wastewater produced by evaporation crystallization in a new material enterprise production line as the research object, and compared the removal effect of chemical oxygen demand (COD) and chroma in wastewater under different catalyst systems; At the same time, the effects of reaction time, catalyst dosage, wastewater pH, UV lamp irradiation mode and chloride ion concentration in raw wastewater on the photocatalytic reaction efficiency were investigated. [Results] The prepared catalysts had a certain treatment effect on this kind of wastewater, and the powdered catalyst TiO_2 -AC-F had the best photocatalytic removal effect on COD and chroma in the diluted evaporation crystallization mother liquor. When pH value was 7, the dosage of catalyst was 3 g/L, and the reaction time was 120 min, the best reaction effect could be achieved, and the removal rate of COD and chroma could reach 57.3% and 98.33%. UV lamp immersion irradiation was more conducive to the photocatalytic reaction system, and the COD removal rate could reach 77.66% at 120 min, which was 20.36% higher than that of hanging irradiation. At the same time, it was found that the increase of Cl^- mass concentration in raw water would lead to the continuous reduction of COD removal rate in the photocatalytic

[收稿日期] 2024-05-23

[作者简介] 贺志勇(1969—), 男, 正高级工程师, 主要从事水污染治理等工作, E-mail: suzuoyan@sina.cn。

[通信作者] 方志斌(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事环境保护等工作, E-mail: fangmiu@163.com。

system, and the higher the Cl^- mass concentration, the greater the impact. [**Conclusion**] The combination of activated carbon and TiO_2 can use the high specific surface area and good adsorption performance of activated carbon to improve the adsorption capacity of the catalyst for pollutants, so as to increase the effective contact area of photocatalytic reaction, which is conducive to the enrichment and degradation of organic pollutants. The result can provide reference for the application of photocatalytic oxidation technology in the treatment of refractory organic wastewater.

Keywords photocatalysis; TiO_2 ; activated carbon; catalyst; organic wastewater

随着工业和经济的快速发展,环境污染,特别是水污染,已成为全球环境问题的重要关注点^[1]。生物降解法、吸附法、膜法等多种方法已被开发出来用于去除废水中的有机污染物^[2]。然而,工业反渗透浓水、蒸发结晶母液中的大部分有机物难以进一步生化降解,废水污染物成分复杂,高化学需氧量(COD)、高色度、高盐等一直是其处理及回用的技术难点和重点。因此,研究出高效、无二次污染的去难降解有机污染物的方法非常重要。

光催化氧化技术作为一种已证明的可以将废水中大部分有机物催化氧化成 CO_2 、 H_2O 和无机离子的高级氧化技术,既可应用于难降解废水的预处理,提高废水的可生化性,还可应用于难降解废水生化处理后的深度处理。在目前正在研究的多种光催化剂中,二氧化钛(TiO_2)被认为是废水处理中最有前景的光催化剂之一,因为它具有光稳定性、低能耗、适当的平带电位、相对较低的成本和无毒性^[3]的特点。然而,由于 TiO_2 的带隙偏高,电子和空穴容易复合,会导致光生载流子利用率降低^[4];效果好的 TiO_2 多为纳米颗粒,在水中容易团聚且回收困难^[5];处理高盐、高色度废水时, TiO_2 催化剂的活性易受到抑制。这些问题导致了 TiO_2 的低光催化效率,并限制了其在有机污染物废水处理方面的实际应用和进一步发展。因此,使催化剂能最大限度地产生光生电子空穴对,促进电子转移延长载流子寿命,使催化剂便于回收利用,对于提高 TiO_2 的光催化效率至关重要。

活性炭(AC)作为一种常用于吸附有机污染物的材料,具有成本低、获取容易、比表面积大、孔隙结构多、表面官能团丰富及化学稳定性高等特点。国内外已有相关研究^[6]表明,将 AC 与 TiO_2 复合可以实现“吸附+光催化”协同增效的效果。因此,利用 AC 的吸附特性和 TiO_2 的光催化机制来制备的 TiO_2 -AC 材料为吸附技术和光催化技术的有机结合开辟了新的思路^[7-8]。

本文采用浸渍法将商用锐钛型纳米 TiO_2 负载在 AC 上制备了柱状催化剂 TiO_2 -AC-Z、粉状催化剂 TiO_2 -AC-F。将商用 AC 与 TiO_2 通过特定工艺复合,形成具有高吸附性和高效光催化活性的新型复合材料。AC 的大比表面积和丰富的孔隙结构为 TiO_2 提供了更多的附着点,同时增强了对污染物的吸附能力,而 TiO_2 在光照下产生的光生电子和空穴则促进了污染物的氧化降解。通过对催化剂的优选和工艺优化确定最佳反应参数,以期在光催化氧化工艺在处理工业反渗透浓水、蒸发结晶母液这类难降解有机废水方面提供指导。

1 试验材料和方法

1.1 试剂与仪器

试剂:10 nm 锐钛型 TiO_2 ;煤质柱状 AC、粉末 AC;去离子水;硫酸,无水乙醇,氢氧化钠,均为分析纯。

仪器:真空干燥箱;箱式电阻炉;HCA-101 标准 COD 消解器;60 W 紫外灯。

1.2 试验废水

试验废水为某新材料企业蒸发结晶母液,该母液污染物成分复杂,含有大分子有机物、盐类、悬浮物等不挥发物质,COD 质量浓度最高可达 35 000 mg/L,溶解性总固体(TDS)质量浓度为 46 522 mg/L;该母液色度极高,呈不透明黑褐色状,透光性较差。为探究光催化对该类废水的处理效果,实验室将该母液稀释 100 倍后进行反应,主要水质指标如表 1 所示。

表 1 主要水质指标

Tab. 1 Main Water Quality Indices	
指标	数值
pH 值	6.9
COD 质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	314~392
色度/倍	300
氨氮质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	85~96
总氮质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	126~137
氯化物质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	2

1.3 试验方法

1.3.1 TiO₂-AC 制备

采用浸渍法制备 TiO₂-AC 催化剂。先分别取 20 g 的煤质柱状 AC、粉末 AC,用去离子水冲洗,直至溶液的 pH 保持不变,将洗涤后的 AC 放在 80 ℃ 烘箱中干燥 24 h 后备用并称重,质量记为 m_1 。按 TiO₂ 与 AC 的质量比为 1 : 2,取 10 g 的 TiO₂ 粉末在 50 mL 去离子水中均匀溶解,恒温搅拌后超声分散 30 min 后加热至 70 ℃,分别加入烘干好的柱状 AC 和粉末 AC 搅拌 1 h,呈灰色相后将上清液倒掉,在 150 ℃ 下烘干。将干燥后的样品在 500 ℃ 下煅烧 2 h,对制得的催化剂进行称重,质量记为 m_2 ,TiO₂ 的负载量为 $(m_2 - m_1) / m_1$ 。

制得柱状催化剂记为 TiO₂-AC-Z,为表面呈灰黑色的柱状固态,称重后 TiO₂ 的负载量为 44.7%;粉状催化剂记为 TiO₂-AC-F^[9],为深灰色粉末,称重后 TiO₂ 的负载量为 47.6%。

1.3.2 光催化反应试验

为探讨反应的最佳工艺条件,分别改变催化剂种类、原水 pH、催化剂投加量及 Cl⁻ 质量浓度进行试验分析。将紫外灯置于烧杯正上方,距离烧杯 40 cm 高,在烧杯中加入定量的废水及定量的 TiO₂ 粉末后曝气搅拌,确保 TiO₂ 粒子悬浮于溶液中,先进行 30 min 暗反应使吸附达到平衡^[10]后再进行紫外光照反应。反应一段时间后,每 30 min 取一次样,样品用慢速定量滤纸进行过滤,滤液做水质分析。

为对比光照方式对反应效果的影响,以上述试验完成后得到的最佳反应条件进行紫外灯浸没照射和悬挂照射对比试验。浸没照射时将紫外灯放置于防水套管后浸没在反应水样中,其余条件与上述试验保持一致。

1.3.3 分析方法

试验主要考察水质指标为 COD、色度。COD 参照《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)测定。色度参照《水质 色度的测定 稀释倍数法》(HJ 1182—2021)测定。去除率计算如式(1)。

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中: η ——去除率;

C_0 ——污染物初始质量浓度,mg/L;

C_t ——光照 t min 时溶液中污染物的质量浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 不同催化剂性能评价

在不改变反应原水的 pH 的情况下,分别选用 TiO₂、TiO₂-AC-Z、TiO₂-AC-F 作为催化剂进行光催化反应,催化剂的投加量均为 3 g/L。每 30 min 取一次样,样品用滤膜过滤后测定 COD 含量,结果如图 1 所示,并测定反应 60 min 时的水样色度,结果如表 2 所示。

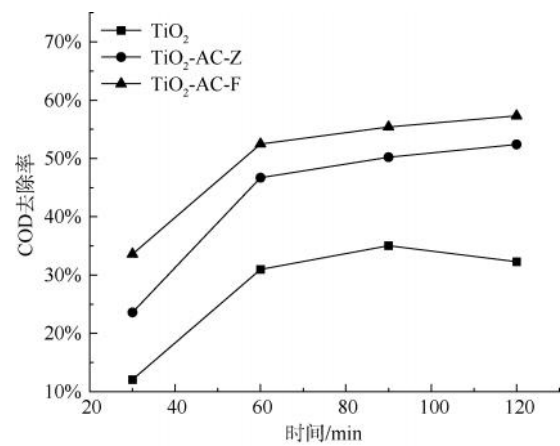


图 1 不同催化剂对 COD 去除的影响

Fig. 1 Effect of Different Catalysts on COD Removal

表 2 不同催化剂对色度去除的影响

Tab. 2 Influence of Different Catalysts on Chroma Removal

催化剂种类	色度/倍	去除率
TiO ₂	30	90.00%
TiO ₂ -AC-Z	5	98.33%
TiO ₂ -AC-F	5	98.33%

由图 1 可知,3 种催化剂对光催化反应体系均有促进作用,COD 去除率为 TiO₂-AC-F>TiO₂-AC-Z>TiO₂。负载了 TiO₂ 的 TiO₂-AC-Z 和 TiO₂-AC-F 催化效果明显较优,TiO₂-AC-Z 和 TiO₂-AC-F 对 COD 的去除率均随着反应时间的延长而增加,60 min 时可达 52.47%,120 min 时可达 57.35%。但在 60 min 后 COD 去除率增加趋势明显放缓,考虑到实际工程运用中的经济性,建议反应时间控制在 60 min。由表 2 可知,脱色率都较为不错,TiO₂-AC-Z 和 TiO₂-AC-F 的效果较佳,在 60 min 时的色度去除率可达 98.33%。综合来看,TiO₂-AC-F 的吸附作用最强,光催化活性最佳。分析反应作用原理,认为在光照条

件下催化剂产生大量的电子-空穴对,在溶液中形成羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧自由基等活性物质,可将吸附在催化剂表面的有机物降解成 CO_2 和 H_2O ,从而实现 COD 的去除及脱色^[11];AC 与 TiO_2 结合后,可以利用 AC 的大比表面积和良好的吸附性能,提高催化剂对废水中污染物的吸附能力,从而增加光催化反应的有效接触面积,有利于有机污染物的富集和降解。 TiO_2 -AC-F 作为粉末型催化剂,在反应体系中比柱状催化剂有更好的分散效果,增大了反应接触面积,更利于光催化反应的进行,呈现更好的反应效果。

2.2 pH 对试验结果的影响

分别取 250 mL 反应废水,用硫酸和氢氧化钠溶液对废水的 pH 进行调节,使废水的初始 pH 值分别为 3、5、7、9,反应时间为 60 min,催化剂投加量为 3 g/L。对比 TiO_2 、 TiO_2 -AC-Z 和 TiO_2 -AC-F 在不同 pH 条件下光催化降解 COD 的影响,结果如图 2 所示。

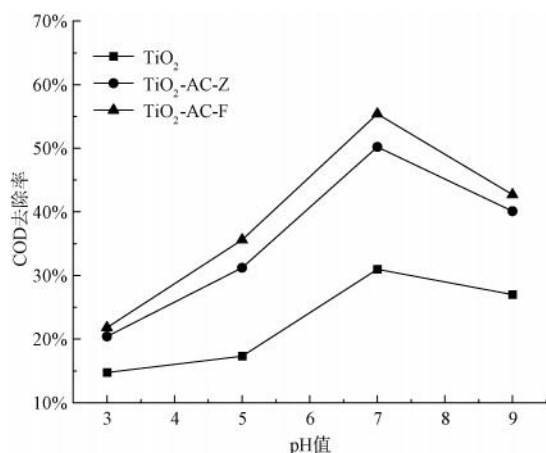


图 2 pH 值对 COD 去除率的影响

Fig. 2 Effect of pH Values on COD Removal Rates

由图 2 可知,在 pH 较低的情况下,COD 的去除率不佳,这是由于反应体系内 H^+ 过高不利于空穴(h^+)与水分子形成 $\cdot\text{OH}$ ^[11]。随着反应溶液中 OH^- 含量增多, h^+ 可以与 OH^- 生成 $\cdot\text{OH}$,更好地促进对污染物的降解。另外在生成 $\cdot\text{OH}$ 的同时可以限制光生电子空穴的复合,可提高催化剂的光催化活性^[12]。在 pH 值为 7 时, TiO_2 -AC-F 对 COD 的去除率最高可达 55.4%,比 TiO_2 -AC-Z 的 COD 去除率高 5.2%。但由于反应废水的 TDS 较高,随着 pH 的升高,易生成沉淀物,干扰对污染物的吸附,从而造成 COD 去除率的下降^[13]。由于在中性条件下催化剂

对污染物具有较好的降解活性,在其他性质研究中均不对反应废水的 pH 进行调整。

2.3 催化剂投加量对反应效果影响

根据上述试验对比, TiO_2 -AC-F 的光催化效果最佳,因此在反应水样中加入不同剂量 TiO_2 -AC-F 分析催化剂投加量对反应效果的影响,结果如图 3 所示。

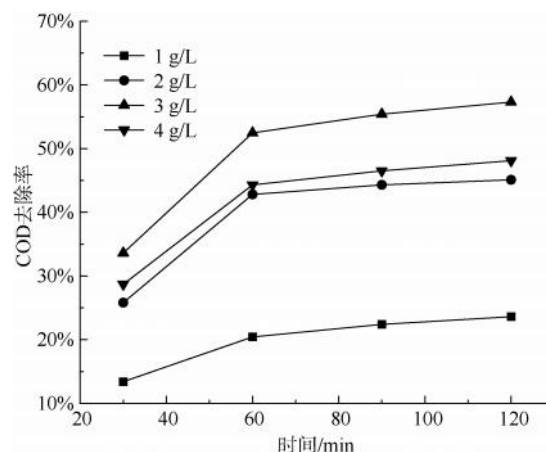


图 3 催化剂投加量对 COD 去除率的影响

Fig. 3 Effect of Catalyst Dosages on COD Removal Rates

由图 3 可知,随着催化剂投加量增大,COD 的去除率也增加,当催化剂投加量为 3 g/L 时,反应 120 min 时的 COD 去除率可达 57.3%。这是由于在紫外光的照射下,催化剂表面会产生空穴-电子对,会激发水中 $\cdot\text{OH}$ 的生成,随着体系内催化剂含量的增加,生成的 $\cdot\text{OH}$ 也将越多,从而更好地促进光催化反应。但同时也可以看出,当催化剂投加量为 4 g/L 时,体系内 COD 的去除率反而下降,认为是由于催化剂粉末过多地悬浮在反应体系中会屏蔽和散射紫外光,从而使得反应体系对紫外光的利用效率降低,导致 COD 去除率下降^[14]。

2.4 Cl^- 含量对反应体系的影响

考虑到工业反渗透浓水、蒸发结晶母液中氯化物含量往往较高,为探究 Cl^- 对光催化反应效果的影响,在试验废水中加入一定量的氯化钠,将 Cl^- 质量浓度调至 0、500、1 000、2 000、4 000、8 000 mg/L,催化剂为 TiO_2 -AC-F,投加量为 3 g/L。考察 Cl^- 质量浓度对反应体系的影响,结果如图 4 所示。随着 Cl^- 质量浓度的增加,体系内 COD 的去除率不断降低,且 Cl^- 质量越高,对 COD 去除率的影响越大。 Cl^- 质量浓度为 500 mg/L 时 COD 去除率下降了

2.69%, 2 000 mg/L 时下降了 10.15%, 4 000 mg/L 时下降了 30.45%; 8 000 mg/L 时下降了 43.87%。 Cl^- 质量浓度对反应体系的 COD 去除影响很大,这主要是高质量浓度的 Cl^- 可使催化剂表面失活,导致光吸收率下降^[15],会猝灭光催化体系中的高活性物种,如 $\cdot\text{OH}$ 、硫酸根自由基 ($\cdot\text{SO}_4^-$)、空穴 (h^+) 等^[16],导致光催化降解效率降低。

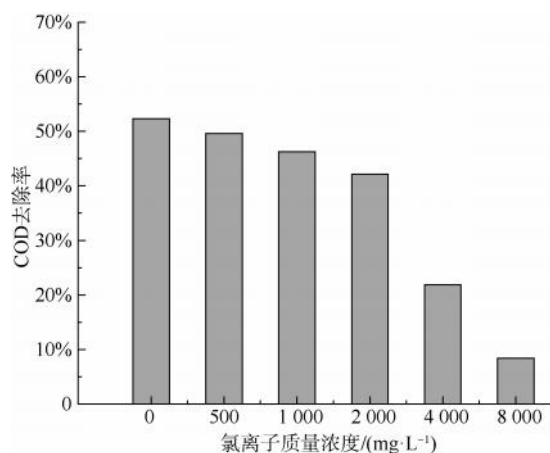


图4 Cl^- 质量浓度对反应体系的影响

Fig. 4 Influence of Cl^- Mass Concentration on Reaction System

2.5 光照方式对反应效果的影响

为进一步提高光催化的反应效率,对比光照方式对反应效果的影响,分别进行紫外灯浸没照射和悬挂照射试验。浸没照射时将紫外灯放置于防水套管后浸没在反应水样中;悬挂照射时将紫外灯置于烧杯正上方,距离烧杯 40 cm 高。将紫外灯浸没在水中中进行光催化反应,催化剂为 $\text{TiO}_2\text{-AC-F}$,投加量为 3 g/L。由图 5 可知,浸没照射时的 COD 去除率明显优于悬挂照射,在 120 min 时的 COD 去除率可达 77.66%,比悬挂照射高 20.36%。认为是由于紫外灯浸没在水中使光照不易被屏蔽,光照强度更大,反应体系对紫外光的利用效率增高从而提高了 COD 去除率。

3 结论

(1) 活性炭负载了 TiO_2 后的光催化性能明显得到提升,且粉状催化剂 $\text{TiO}_2\text{-AC-F}$ 的催化效果优于柱状催化剂 $\text{TiO}_2\text{-AC-Z}$,在 60 min 时对稀释后的蒸发结晶母液 COD 去除率为 52.47%,色度去除率可达 98.33%。

(2) 在 pH 值为 7 时, $\text{TiO}_2\text{-AC-F}$ 对 COD 的去除

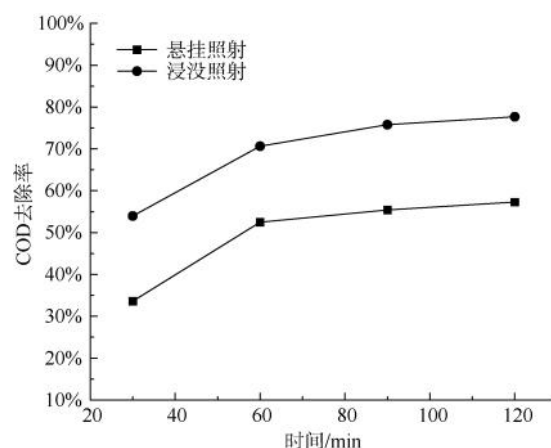


图5 光照方式对 COD 去除率的影响

Fig. 5 Influence of Lighting Mode on COD

Removal Rates

率最高可达 55.4%,酸性和碱性条件都不利于该反应体系;随着催化剂投加量增加,COD 的去除率越高,当 $\text{TiO}_2\text{-AC-F}$ 投加量为 3 g/L 时,反应 120 min 时的 COD 去除率可达 57.3%。

(3) Cl^- 质量浓度的增加,会导致光催化体系内 COD 的去除率不断降低,且 Cl^- 质量浓度越高影响越大。

(4) 紫外灯浸没照射时的 COD 去除率明显优于悬挂照射,在 120 min 时的 COD 去除率可达 77.66%,比悬挂照射的高 20.36%。

参考文献

- [1] Xia Y, Xu L, Peng J H, et al. TiO_2 @ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ core/shell spheres with uniform mesoporous structures for high performance visible-light photocatalytic application [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(15): 18844-18851.
- [2] Guo N, Zeng Y, Li H Y, et al. Novel mesoporous TiO_2 @ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ hollow core @ shell heterojunction with enhanced photocatalytic activity for water treatment and H_2 production under simulated sunlight [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 353: 80-88. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.03.044.
- [3] Gao X, Ren P G, Wang J, et al. Fabrication of visible-light responsive TiO_2 @C photocatalyst with an ultra-thin carbon layer to efficiently degrade organic pollutants [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 532: 147482. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147482.
- [4] Khalyavka T, Bondarenko M, Shcherban N, et al. Effect of the C and S additives on structural, optical, and photocatalytic properties of TiO_2 [J]. *Applied Nanoscience*, 2019, 9(5):

- 695-702. DOI: 10.1007/s13204-018-0838-1.
- [5] 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.
Shui B Y, Song X S, Fan W J. Research progress and challenges of photocatalytic technology in water treatment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(S2): 356-363.
- [6] 王若羽, 王文语, 卢西, 等. 生物质炭/TiO₂ 复合材料去除偶氮染料的研究进展[J]. 工业水处理, 2023, 43(9): 32-42.
Wang R Y, Wang W Y, Lu X, et al. Research progress on removal of azo dyes by biochar/TiO₂ composites [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(9): 32-42.
- [7] Colmenares J C, Varma R S, Lisowski P. Sustainable hybrid photocatalysts: Titania immobilized on carbon materials derived from renewable and biodegradable resources [J]. Green Chemistry, 2016, 18(21): 5736-5750.
- [8] 万文亚. 二氧化钛/生物炭复合材料的研究进展[J]. 上海化工, 2020, 45(1): 41-43.
Wan W Y. Advance in titanium dioxide/biochar composites [J]. Shanghai Chemical Industry, 2020, 45(1): 41-43.
- [9] Jamil T S, Ghaly M Y, Fathy N A, et al. Enhancement of TiO₂ behavior on photocatalytic oxidation of MO dye using TiO₂/AC under visible irradiation and sunlight radiation [J]. Separation and Purification Technology, 2012, 98: 270-279. DOI: 10.1016/j.seppur.2012.06.018.
- [10] 王佳炜, 王国桥, 于添, 等. 碳基改性 TiO₂ 去除水中典型污染物的试验[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 121-129.
Wang J W, Wang G Q, Yu T, et al. Experiment on modified carbon-doped TiO₂ for typical pollutants removal in aqueous solution [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 121-129.
- [11] 高哲仪. 二氧化钛光催化降解印染废水研究[J]. 化工生产与技术, 2023, 29(3): 21-24.
Gao Z Y. Study on photocatalytic degradation of printing and dyeing wastewater by titanium dioxide [J]. Chemical Production and Technology, 2023, 29(3): 21-24.
- [12] 高昕. 生物质碳/二氧化钛复合材料的制备及光催化性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
Gao X. Study on fabrication and photocatalytic performance of biomass carbon/titanium dioxide composite [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [13] 徐欣国, 代陈林, 储著岳, 等. 化学预处理联合 UV-Fenton 法处理 EDTA 清洗废液[J]. 工业水处理, 2014, 34(11): 28-31.
Xu X G, Dai C L, Chu Z C, et al. Study on the treatment of EDTA cleaning wastewater by chemical pretreatment combined with UV-Fenton [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(11): 28-31.
- [14] 薛诚, 刘东方, 梁啸夫. 光催化氧化降解高盐废水中 EDTA 的研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(5): 28-31, 41.
Xue C, Liu D F, Liang X F. Photocatalytic oxidation degradation of organic matter in high-saline wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(5): 28-31, 41.
- [15] 袁瑞霞. 基于自由基反应的高盐染料废水降解动力学及有机卤代物(AOX)生成机制研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
Yuan R X. Free radicals-based degradation kinetics and AOX formation mechanisms in the treatment of high salinity dye wastewater [D]. Shanghai: Donghua University, 2012.
- [16] 池英华. 氯离子致光催化失活机制及阻断方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
Chi Y H. Mechanism and effective blocking measures of chloride ion impeding photocatalytic process [D]. Jinan: Shandong University, 2021.