

# 漂浮陶粒负载氧化钛光催化降解对硝基苯酚 试验研究

邵广柏<sup>1</sup>, 罗俊扬<sup>2</sup>, 赵愿<sup>2</sup>, 李瑞龙<sup>2</sup>, 黄佩<sup>2</sup>, 成岳<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>江西景江安全环保技术有限公司, 江西 景德镇

<sup>2</sup>景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院, 江西 景德镇

收稿日期: 2025年6月8日; 录用日期: 2025年6月30日; 发布日期: 2025年7月8日

## 摘要

本文研究了漂浮陶粒负载氧化钛样品光催化处理有机废水的影响因素和最佳处理工艺条件。结果表明, 氧化钛煅烧600°C, 100 mL废水氧化钛的负载量为870 mg/100 g陶粒, pH = 4, 暗反应30 min, 15 W的紫外灯下光催化1.5 h, 对硝基苯酚废水浓度15 mg/L去除率达到74%。在最佳处理工艺的基础上, 对回收的陶粒二次负载进行反应动力学研究, 实验结果表明二氧化钛光催化处理对硝基苯酚仍然有一定的降解效果。对最佳处理条件下的样品进行X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)表征, 发现用溶胶-凝胶法制备氧化钛大量负载到多孔陶粒上负载量增大, 不易脱落。在有机废水处理过程中, 陶粒可以回收再生重复利用, 并且能达到一定的降解率, 既环保又高效, 对处理有机废水有着新的指导意义和现实意义, 为漂浮陶粒处理废水的后续研究提供了参考。

## 关键词

漂浮陶粒, 氧化钛, 吸附, 光催化降解, 对硝基苯酚

# Study on Photocatalytic Degradation of P-Nitrophenol by Floating Ceramsite Supported Titanium Oxide

Guangbai Shao<sup>1</sup>, Junyang Luo<sup>2</sup>, Yuan Zhao<sup>2</sup>, Ruilong Li<sup>2</sup>, Pei Huang<sup>2</sup>, Yue Cheng<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Jiangxi Jingjiang Safety and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Jingdezhen Jiangxi

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen Jiangxi

Received: Jun. 8<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 30<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 8<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 邵广柏, 罗俊扬, 赵愿, 李瑞龙, 黄佩, 成岳. 漂浮陶粒负载氧化钛光催化降解对硝基苯酚试验研究[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(3): 300-309. DOI: 10.12677/amc.2025.133033

## Abstract

This article investigates the influencing factors and optimal treatment process conditions of photocatalytic treatment of organic wastewater using floating ceramic particles loaded with titanium oxide samples. The results showed that when titanium oxide was calcined at 600°C, the loading amount of titanium oxide in 100 mL of wastewater was 870 mg/100 g of ceramic particles, pH = 4. After 30 minutes of dark reaction and 1.5 hours of photocatalysis under a 15 W UV lamp, the removal rate of nitrophenol wastewater with a concentration of 15 mg/L reached 74%. On the basis of the optimal treatment process, the reaction kinetics of the secondary loading of recycled ceramic particles were studied. The experimental results showed that titanium dioxide photocatalytic treatment still had a certain degradation effect on nitrophenol. The samples under the optimal processing conditions were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). It was found that the amount of titanium oxide loaded onto porous ceramsite by sol-gel method was increased, and it was not easy to fall off. In the process of organic wastewater treatment, ceramic particles can be recycled and reused, and can achieve a certain degradation rate, which is both environmentally friendly and efficient. It has new guiding and practical significance for the treatment of organic wastewater, and provides reference for the subsequent research of floating ceramic particles in wastewater treatment.

## Keywords

Floating Ceramic Particles, Titanium Oxide, Adsorption, Photocatalytic Degradation, P-Nitrophenol

Copyright © 2025 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. 前言

由于我国化工企业及科技不断发展,在国民生产总值不断提高,人们的生活水平日新月异的同时,给环境带来了严重的污染[1][2]。目前水环境污染问题是我国最大的环境问题之一,其中在工业生产过程中,大量的有机污染物排放到湖泊和河流中,危害人类的健康,水生物死亡恶化环境[3][4]。如何用经济环保的方式降低工业废水中有机物的含量,是我们处理水体污染迫在眉睫的问题。处置污水中有机污染物的主要方式有物理方法,氧化还原方法,生物方法等;这些技术虽然处理水体中有机物有一定的效果但是对环境容易造成二次污染。在十九世纪,美国日裔 Fujishima A 和 Honda K 两位教授[5][6]首次报告结果表明制备氢气可利用二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)单晶电极光催化分解水获得这一理论依据,从而引发了利用太阳能直接分解水制备氢的启发,开辟了化学领域光催化研究的新研究探索方向。1976年 JH Carey 等人[7]研究探索得到在紫外光照射下,具有光催化氧化作用的二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)可使难降解有机化合物多氯苯脱氢实验结果。同时低廉的太阳光、无毒无污染可反复应用的催化剂等好处更使得光催化技术的运用具备无穷的发展前景。多孔陶粒具有良好的吸附性能,但它们只是把有机物从水中转移到固体表面,而 TiO<sub>2</sub>对有机污染物具有非常好的光催化降解作用,能够有效地降低水中有机物的浓度;如果将 TiO<sub>2</sub>负载到多孔陶粒上去,能够更加有效地处理有机污染物,同时陶粒能回收重复利用,提高它的可生化性。

多孔漂浮陶粒具备低密度,高气缸压缩力,高孔隙率,高软化系数,优良的抗冻性和极佳的有机物吸附性质,耐碱性聚集体[8]。特别是多孔陶粒具有密度小,孔隙率高,形态和成分均匀等优点,耐腐

蚀,耐冻融,耐冲击,绝缘性能好等诸多优点。根据这些优点,可以广泛地应用于各种工业污水的处理过程;在目前的半导体光催化剂材料中,纳米 TiO<sub>2</sub> 在太阳光的照射下具有很强的氧化能力,并且它的化学性质稳定,能够有效催化对硝基苯酚溶液。

## 2. 实验

### 2.1. 实验原料、药品及主要仪器及设备

实验所用的悬浮陶粒是黑色,购买于江西省志强陶粒有限公司,堆积密度 293 kg/m<sup>3</sup> 筒压强度 1.15 Mpa, 1 h 吸水率 15.2%,软化系数 0.83,平均粒径系数 1.5, P25 是商业用氧化钛光催化剂。药品见表 1,主要仪器及设备见表 2。

Table 1. Experimental reagents

表 1. 实验的试剂

药品名称	化学式	纯度	生产厂家	备注
钛酸正丁酯	C <sub>16</sub> H <sub>36</sub> O <sub>4</sub> Ti	C.P.	上海久亿化学试剂有限公司	M = 340.36
对硝基苯酚	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>3</sub>	A.R.	华东师范大学化工厂	M = 139.11
双氧水	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	C.P.	西陇化工股份有限公司	M = 34.01
去离子水	H <sub>2</sub> O	A.R.	实验室制备	M = 18
无水乙醇	CH <sub>3</sub> COOH	C.P.	上海试剂一厂	M = 60.05
盐酸	HCl	A.R.	上海国药集团	M = 98.08
氢氧化钠	NaOH	A.R.	上海国药集团	M = 40
冰乙酸	60.05	A.R.	天津市恒兴化学试剂制造有限公司	M = 364.45

Table 2. Experimental equipment and instruments

表 2. 实验仪器及设备

仪器名称	仪器型号	生产厂家
电子天平	FA1004B	上海精密科学仪器有限公司
六联磁力加热搅拌器	CJJ-931	江苏金坛市金城国胜实验仪器厂
集热式恒温加热磁力搅拌器	DF-101S	河南予华责任有限公司
马弗炉	WAS-12-13	江苏丁山电器保护厂
紫外灯	UVC-15W	东莞市尔谷光电科技有限公司
艾柯实验室超纯水机	Exceed-cd-08	成都唐氏康宁科技发展有限公司
电热鼓风干燥箱	BGZ-72	上海博讯实业有限公司
石英比色皿	751	宜兴市伟鑫仪器有限公司
紫外可见分光光度计	5100B	上海元析仪器有限公司
X 射线分析仪(XRD)	DX-2700B	丹东方圆仪器有限公司
扫描电子显微镜 SEM	KYKY-EM3900M	上海州怡仪器设备有限公司

除了表 2 中仪器及设备外本实验还要用到的仪器有: 250 mL 烧杯(若干)、100 mL 烧杯(若干)、200 mL 烧杯(若干)、玻璃棒、100 mL 量筒(若干)、试管刷、500 mL 容量瓶(三个)、移液枪、pH 试纸、磁力搅

拌子(若干)、玻璃比色皿(2个)等等。

## 2.2. 制备工艺

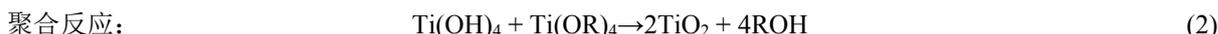
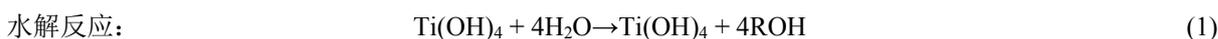
### 1) TiO<sub>2</sub>的制备

a) 在室温下取 10 mL 太酸正丁酯, 加入 35 mL 的无水乙醇, 用磁力搅拌器搅拌 10 min, 混合均匀后形成透明的黄色溶液 A。

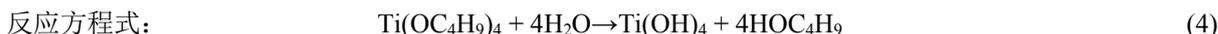
b) 取 4 mL 冰乙酸和 10 mL 蒸馏水加到另 35 mL 无水乙醇中剧烈搅拌, 得到溶液 B, 滴加盐酸, 使 pH = 4。

c) 在室温水浴下, 在剧烈搅拌下将溶液 A 加入溶液 B 中。搅拌 20 min, 再静置 30 min 得到 TiO<sub>2</sub> 溶胶。

这个过程中的化学反应方程式如下:



对于上述反应, 钛醇盐使用的是钛酸正丁酯:



### 2) 多孔漂浮陶粒负载 TiO<sub>2</sub> 的制备

称取 100 g 悬浮陶粒, 放入塑料杯中, 加入适量蒸馏水, 再加入 100 mL 盐酸, 浸泡至陶粒表面孔隙率增多, 100℃ 烘干, 再放入马弗炉煅烧到 600℃ 保温 2 h。将一定量煅烧好的陶粒称重记为 m<sub>1</sub>, 把称好的陶粒放入 TiO<sub>2</sub> 溶胶中, 待负载后取出。100℃ 烘干后放入马弗炉煅烧 600 度保温 2 h, 把负载好煅烧后的陶粒称重记为 m<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> 的负载量为 (m<sub>2</sub> - m<sub>1</sub>)/m<sub>1</sub>, 干燥储存备用, 经过测算, TiO<sub>2</sub> 负载量为 87 mg/1 g 漂浮陶粒。

## 2.3. 对硝基苯酚的标准曲线

称取 0.05 g 对硝基苯酚固体定溶于 500 mL 容量瓶中配置成 100 mg/L 的标准储备液, 分别配制标液浓度为 2、4、6、8、10、14、16、20 mg/L 对硝溶液, 用紫外分光光度计测定吸光度, 绘制标准曲线。核对文献资料发现在 317 nm 处出现最大吸收峰, 以定蒸馏水为参比溶液, 然后测定不同浓度的对硝基苯酚的吸光度进行分析: 对硝基苯酚标准曲线方程:  $A = 0.0637C + 0.00293$  ( $R^2 = 0.9994$ )。

## 2.4. 实验设计

### 1) 表头设计

根据参考文献[9]可知, 氧化钛光催化降解有机物的影响因素有不同光源, pH 值, 反应时间, 初始浓度等。本研究选用在紫外灯下的光照时间(30 min, 60 min, 90 min)、废水的初始浓度(10 mg/L, 15 mg/L, 20 mg/L)、PH (4, 7, 10)及氧化钛的烧结温度(500℃, 550℃, 600℃)为影响因素, 选取的正交实验表 3 为 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 研究漂浮陶粒负载氧化钛降解对硝基苯酚的处理效果。

### 2) 吸附光催化降解对硝基苯酚性能的研究

取 100 mL 一定浓度的对硝基苯酚于烧杯中, 调节 pH, 投加 10 克负载 TiO<sub>2</sub> 的陶粒, 加入 5 mL 的双氧水, 暗反应 30 min, 在紫外灯下光照一定的时间, 取出静置, 取上清液, 用 0.45 μm 的滤膜抽滤, 在波

长为 317 nm 的分光光度计中测其吸光度, 根据标准曲线测其处理后的浓度, 计算去除率。并按照正交表中的试验序号进行实验。

**Table 3.**  $L_9(3^4)$  of experimental factors and levels

**表 3.**  $L_9(3^4)$  实验因素与水平

水平	因素	A	B	C	D
		光照时间(min)	初始浓度(mg/L)	pH	烧结温度(°C)
1		30	10	4	500
2		60	15	7	550
3		90	20	10	600

降解率公式计算:

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $\eta$ ——对硝基苯酚去除率;

$C_0$ ——对硝基苯酚初始浓度, mg/L;

$C_t$ ——处理后对硝基苯酚浓度, mg/L。

### 3) 回收陶粒的再生及动力学研究

称取 10 克负载  $\text{TiO}_2$  的陶粒投加于含 100 mL 浓度为 15 mg/L 对硝基苯酚溶液的锥形瓶中, 调节溶液 pH 为 4 左右, 设定温度为 25°C, 在振荡器上以 200 r/min 的转速振荡吸附, 每隔一定时间取样测定甲基橙浓度, 计算吸附量并以吸附量对时间作图得吸附动力学曲线。

## 3. 结果分析与讨论

### 3.1. 正交实验结果分析

按照正交表  $L_9(3^4)$  进行实验的结果如表 4。并根据各因素相应水平的平均去除率  $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 、 $\bar{K}_3$  画图, 得因素指标直观分析图如图 1。

**Table 4.** Results of  $L_9(3^4)$  orthogonal experiments

**表 4.**  $L_9(3^4)$  正交实验结果

因素 试验号	A 光照时间(min)	B 废水浓度(g/L)	C pH	D 烧结温度(°C)	去除率(%)
1	1 (30)	1 (10)	1 (4)	1 (500)	28.82
2	1	2 (15)	2 (7)	2 (550)	41.93
3	1	3 (20)	3 (10)	3 (600)	36.17
4	2 (60)	1	2	3	61.54
5	2	2	3	1	52.36
6	2	3	1	2	44.79
7	3 (90)	1	3	2	58.08
8	3	2	1	3	74.01

续表

9	3	3	2	1	50.94
$\bar{K}_1$	35.64	49.48	49.21	44.04	
$\bar{K}_2$	52.90	56.10	51.47	48.27	
$\bar{K}_3$	61.01	43.97	48.87	57.24	
$\bar{R}$	25.37	12.13	2.6	13.2	
排序	1	3	4	2	

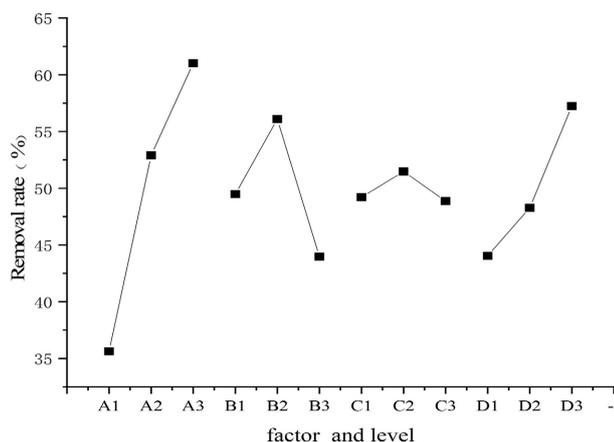


Figure 1. Intuitive analysis of factor levels

图 1. 因素水平直观分析图

(A——光照时间；B——废水的初始浓度；C——pH；D——烧结温度)

由表 4 和图 1、可得出以下结论：

1) 按照极差大小排列出各因素主次关系如下：

主  $\xrightarrow{\hspace{10em}}$  次  
A      D      B      C

2) 直接分析的最佳条件实验为：8 号实验(A3B2C1D3)。

3) 计算分析的最佳条件实验为 A3B2C2D3，即采用 A3 (光照 1.5 h) B2 (初始浓度 15 mg/L)、C2 (pH = 7)、D3 (烧结温度)的条件进行验证，得到的对硝基苯酚的降解率为 78%。

### 3.2. 负载陶粒的再生及动力学研究

#### 1) 回收陶粒在紫外灯下降解对硝基苯酚(加 $H_2O_2$ )

选取最佳条件：把回收的陶粒煅烧 600℃再保温 2 h，然后重新负载氧化钛煅烧 600℃保温 2 h，取 10 克再生后的陶粒用于处理 100 mL 浓度 15 mg/L，pH = 7 的对硝基苯酚模拟废水，回收陶粒反应动力学研究结果见表 5。

由表 5 对回收的陶粒进行负载光催化降解对硝基苯酚的时间的研究可以看出，10 g 再生陶粒加入 100 mL 浓度 15 mg/L 再加 5 ml  $H_2O_2$ ， $-\ln(C/C_0)$ 与光催化时间 t 成线性关系： $-\ln(C/C_0) = 0.128t + 0.347$ ， $R^2 = 0.99273$ 。其线性关系在 0.992873；不加  $H_2O_2$ ， $-\ln(C/C_0)$ 与光催化时间 t 成线性关系： $-\ln(C/C_0) = 0.1064t$

+0.1588,  $R^2=0.99184$ 。说明回归效果较好,符合一级动力学规律[10],加  $H_2O_2$  降解率比不加  $H_2O_2$  的回归系数要高,所以可以看出加氧化剂可以增加氧化钛的光催化效果好。

**Table 5.** Study on the reaction dynamics of recycled ceramists

**表 5.** 回收陶粒反应动力学研究

15 mg/L 对硝基苯酚	暗反应	光催化	光催化	光催化	暗反应	光催化	光催化	光催化
	0.5 h	0.5 h	1 h	1.5 h	0.5 h	0.5 h	1 h	1.5 h
	加 $H_2O_2$				不加 $H_2O_2$			
吸光度 A	0.860	0.743	0.634	0.522	0.896	0.812	0.763	0.709
对硝基苯酚浓度 C	13.04	11.20	9.49	7.73	13.60	12.29	11.52	10.67
$-\ln(C/C_0)$	0.140	0.292	0.458	0.663	0.098	0.199	0.264	0.341
拟合曲线方差程	$-\ln(C/C_0) = 0.128t + 0.347$				$-\ln(C/C_0) = 0.1064t + 0.1588$			
相关系数 $R^2$	0.99273				0.99184			

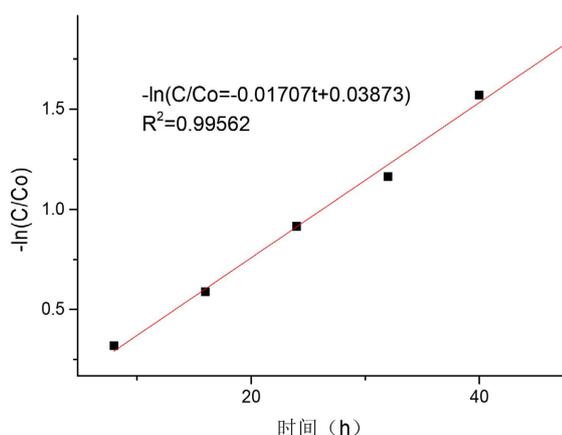
## 2) 回收陶粒在可见光下降解对硝基苯酚(加 $H_2O_2$ )

回收陶粒在可见光下光催化反应动力学研究结果见表 6 和图 2。

**Table 6.** Study on reaction kinetics of recycled ceramists under visible light

**表 6.** 回收陶粒在可见光下光催化反应动力学研究

15 mg/L 对硝基苯酚	8 h	16 h	24 h	32 h	40 h	48 h
吸光度 A	0.724	0.560	0.412	0.328	0.228	0.116
对硝基苯酚浓度 C	10.90	8.33	6.01	4.69	3.12	2.36
$-\ln(C/C_0)$	0.	0.588	0.915	1.163	1.570	1.849
拟合曲线方差程	$-\ln(C/C_0) = -0.01707t + 0.03873$					
相关系数 $R^2$	0.99562					



**Figure 2.** Reaction kinetics of recycled ceramite under visible light

**图 2.** 回收陶粒在可见光下反应动力学研究

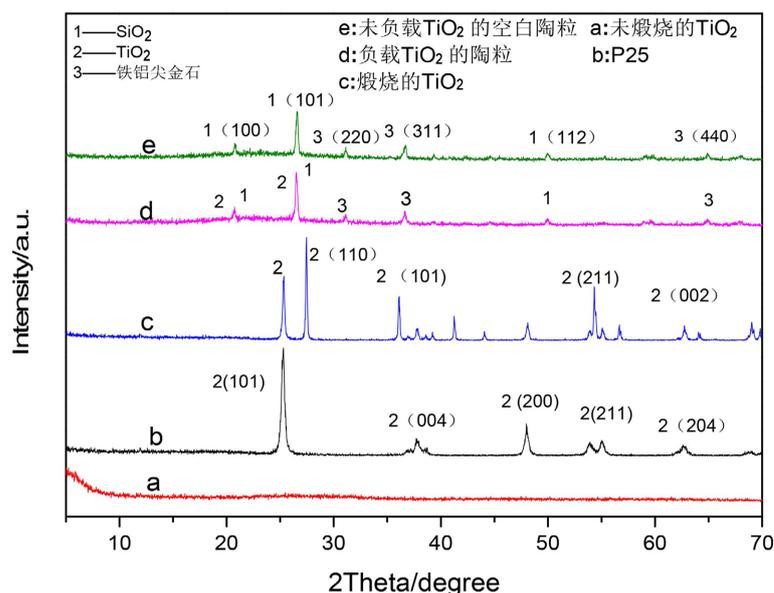
由图 2 可知,对回收的陶粒进行负载在可见光下,催化降解对硝基苯酚的在最佳条件下,加 5 mL

$\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $-\ln(\text{C}/\text{Co})$ 与光催化时间  $t$  成线性关系:  $-\ln(\text{C}/\text{Co}) = -0.01707t + 0.03873$ ,  $R^2 = 0.99562$ 。其线性关系在 0.99 以上, 说明回归效果较好, 对硝基苯酚的  $-\ln(\text{C}/\text{Co})$  和时间  $t$  成线性关。

### 3.3. 样品的表征与分析

#### 1) XRD 分析

图 3 为漂浮陶粒 XRD 衍射图谱, 图 3(a) 为未煅烧的氧化钛、图 3(b) 为 P25 是商业氧化钛, 图 3(c) 煅烧的  $\text{TiO}_2$ 、图 3(d) 负载  $\text{TiO}_2$  的陶粒、图 3(e) 未负载氧化钛的陶粒的 XRD 衍射图谱。



**Figure 3.** XRD diffraction pattern of floating ceramsite (a), P25 (b), calcined  $\text{TiO}_2$  (c),  $\text{TiO}_2$  loaded ceramsite (d) ceramsite without  $\text{TiO}_2$  loading (e)

**图 3.** 未煅烧的  $\text{TiO}_2$  (a)、P25 (b)、煅烧的  $\text{TiO}_2$  (c)、负载  $\text{TiO}_2$  的陶粒(d) 和未负载  $\text{TiO}_2$  的陶粒(e)的 XRD 衍射图谱

由图 3(e) 可以看出空白陶粒含有石英, 铁铝尖金石的衍射峰。由图 3 可以看出 b、c 有相同的衍射峰分别在  $2\theta$  为  $25.28^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $62.82^\circ$ 。由此可以说明实验室用溶胶-凝胶法制备出来的是氧化钛。图 3(a) 中因为是未燃烧的  $\text{TiO}_2$  所以没有出现锐钛矿或金红石晶相, 因此在图中没有明显的衍射峰。由 3 图中 c、d 可以看出在  $27^\circ$  附近有衍射峰, 可能因为负载量偏少所以并没有明显的  $\text{TiO}_2$  衍射峰, 根据上述正交实验有明显的降解效果, 所以负载的是氧化钛。由图中 d、e 可以看出在  $20.78^\circ$ 、 $26.54^\circ$  出现了氧化钛的衍射峰, 分别对应于  $\text{TiO}_2$  的  $\{100\}$ 、 $\{101\}$  晶面。与标准数据 PDF#71-0574 比较吻合, 证明陶粒表面负载了氧化钛。

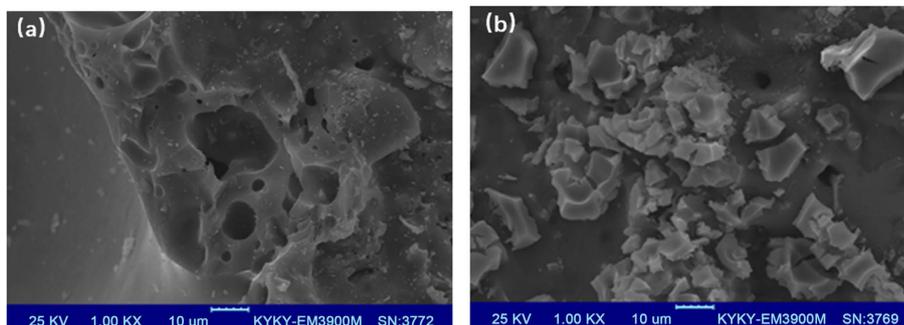
#### 2) SEM 分析

图 4 漂浮陶粒负载  $\text{TiO}_2$  前(a)后(b)的 SEM 形貌, 可以看出表面有很多孔隙, 没有其他杂质负载上去, 可以明显地看到在表面填充了大量的氧化钛晶体, 说明氧化钛被负载到陶粒空隙中。

### 3.4. 机理及应用前景

$\text{TiO}_2$  属于一种 N 型半导体材料, 它的禁带宽度为 3.2 eV, 当它被波长小于或等于 387.5 nm 的光照射时, 价带中的电子就会被激发到导带上, 形成带负电的高活性电子 e, 同时在价带上产生带正电的空穴

$h^+$ 。与金属不同,  $TiO_2$  的能带间缺少连续区域, 电子-空穴对一般有皮秒级的寿命, 足以使光生电子和光生空穴向吸附在  $TiO_2$  表面的物种转移电荷。空穴可以夺取半导体颗粒表面被吸附物质或介质中的电子, 使原本不吸收光的物质被活化并被氧化, 电子受体通过接受表面的电子而被还原, 这样的过程就称为多



**Figure 4.** SEM images of floating ceramic particles before (a) and after (b) loading  
**图 4.** 漂浮陶粒负载  $TiO_2$  前(a)后(b)的 SEM

相光催化, 根据其反应机理图可用以说明: 产生了非常活泼的羟基( $-OH$ )自由基, 超氧离子( $O_2$ )自由基以及 $\cdot HO_2$ 自由基, 这些都是氧化能力很强的活泼自由基, 能氧化大多数的有机污染物及部分无机污染物, 将其最终降解为  $CO_2$ 、 $H_2O$  等无害物质。

本研究成功制备了漂浮陶粒负载氧化钛材料, 并初步研究了其对水中对硝基苯酚的吸附光催化降解性能。对酚类有机物, 含油废水, 染料均有较好的光催化降解效果, 具有较好的应用前景, 是一种环境友好型光催化剂。

#### 4. 结论

1) 采用的是漂浮多孔陶粒为载体, 对氧化钛进行负载实验及研究, 利用多孔陶粒密度小, 内部多孔, 形态、成分较均一, 且具有一定强度和坚固性, 因而具有质轻, 耐腐蚀, 抗冻, 抗震和良好的隔绝性等多功能的特点, 是负载氧化钛优良的载体, 同时多孔陶粒的吸附性能有效地加快氧化钛光催化降解进程, 极大地提高了有机废水处理的效率; 同时多孔陶粒的漂浮型能够更好地加大水中的有机污染物吸附光催化降解的效率。

2) 通过影响因素和最佳处理工艺条件的确定, 氧化钛煅烧  $600^\circ C$ , 负载量为  $87\text{ mg/g}$  陶粒,  $pH = 7$ , 暗反应  $30\text{ min}$ , 光催化  $1.5\text{ h}$  对  $15\text{ mg/L}$  对硝基苯酚废水的去除率达到  $78\%$ , 在最佳处理工艺的基础上, 对回收的陶粒二次负载进行反应动力学研究。对最佳条件的样品用 X 射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)进行表征, 结果显示用溶胶-凝胶法制备氧化钛负载到多孔陶粒的空隙中, 不易脱落, 并且能达到一定的降解率。

3) 把进行光催化降解后的陶粒(负载了氧化钛的陶粒)进行煅烧二次负载。回收后的陶粒进行二次负载后可达到一定的降解效果。用此次方法处理有机废水大大地降低了成本, 经济实用, 可操作性强, 为进一步研究在可见光下处理有机废水打下扎实的基础, 更好地打造环境友好型社会。

#### 参考文献

- [1] Wu, K., Ouyang, M., Luo, Y., Xu, M., Ren, G., An, J., *et al.* (2024) Characteristics and Potential Cytotoxicity of Halogenated Organic Compounds in Shale Gas Wastewater-Impacted Surface Waters in Chongqing Area, China. *Science of the Total Environment*, **912**, Article 169226. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169226>
- [2] Sun, B., Tian, Y., Feng, M., Zhang, S., Yang, H., Qin, J., *et al.* (2025) A Novel Win-Win Wastewater Treatment Process:

- 
- Recover Functional Element from Sludge to Enhances TiO<sub>2</sub> for Deep Photocatalytic Oxidation. *Chemical Engineering Journal*, **507**, Article 160627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160627>
- [3] Li, W., Liao, G., Duan, W., Gao, F., Wang, Y., Cui, R., *et al.* (2024) Synergistically Electronic Interacted PVDF/CDS/TiO<sub>2</sub> Organic-Inorganic Photocatalytic Membrane for Multi-Field Driven Panel Wastewater Purification. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, **354**, Article 124108.
- [4] Liang, Z., Yang, Y., Zhang, Y., Li, S., Zhang, W., Zhang, L., *et al.* (2024) Synergistic Photocatalysis of Mesoporous Confinement Effect and Si-O-Ti Interface for Organic Pollutants Degradation. *Surfaces and Interfaces*, **51**, Article 104715. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.104715>
- [5] Kudo, A. and Miseki, Y. (2009) Heterogeneous Photocatalyst Materials for Water Splitting. *Chemical Society Reviews*, **38**, 253-278. <https://doi.org/10.1039/b800489g>
- [6] Abe, R. (2010) Recent Progress on Photocatalytic and Photoelectrochemical Water Splitting under Visible Light Irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, **11**, 179-209. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2011.02.003>
- [7] Cheng, Y., Cao, T., Xiao, Z., Zhu, H. and Yu, M. (2022) Photocatalytic Treatment of Methyl Orange Dye Wastewater by Porous Floating Ceramsite Loaded with Cuprous Oxide. *Coatings*, **12**, Article 286. <https://doi.org/10.3390/coatings12020286>
- [8] 王军, 刘莹, 胡静茹. 浸渍式提拉法制备 TiO<sub>2</sub> 薄膜的微观结构和润湿性[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 58-62.
- [9] Aoudjit, L., Queirós, J.M., Castro, A.S., Zioui, D., González-Ballesteros, N., Lanceros-Mendez, S., *et al.* (2025) Sunlight-induced Photocatalytic Removal of Paracetamol Using Au-TiO<sub>2</sub> Nanoparticles. *Nanomaterials*, **15**, Article 358. <https://doi.org/10.3390/nano15050358>
- [10] 唐海, 沙俊鹏, 颜酉斌, 蔡昌凤, 王军刚. TiO<sub>2</sub> 光催化耦合 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>体系对硝基苯酚的降解性能及动力学[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 205-211.