

纳米 TiO₂ 光触媒材料对室内 VOCs 去除的效能研究

关则光

樱辉（广东）环保科技有限公司 广东广州

【摘要】本研究聚焦纳米 TiO₂光触媒材料对室内 VOCs 的去除效能。构建了高精度模拟实验平台，选用苯、甲苯等典型 VOCs 作为研究对象，精准调控光照强度、温湿度等关键条件，实时监测材料的去除能力。实验结果显示，在光照强度为 5000lux、温度 25℃、湿度 50%的环境下，该材料对低浓度苯、甲苯、二甲苯的去除率分别高达 85%、80%、78%。深入剖析粒径、光照等影响因素，为室内空气净化技术的进一步发展提供有力依据。

【关键词】纳米 TiO₂；光触媒；室内 VOCs；去除效能；影响因素

【收稿日期】2025 年 4 月 6 日 **【出刊日期】**2025 年 5 月 8 日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250006

Study on the efficiency of indoor VOCs removal by nano TiO₂ photocatalytic materials

Zeguang Guan

SakuraKi (Guangdong) Environmental Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong

【Abstract】 This study focuses on the removal efficiency of indoor VOCs using nano-TiO₂ photocatalytic materials. A high-precision simulation experimental platform was constructed, with typical VOCs such as benzene and toluene selected as research subjects. Key conditions like light intensity, temperature, and humidity were precisely controlled, and the material's removal capability was monitored in real-time. The experimental results show that under conditions of 5000lux light intensity, 25°C temperature, and 50% humidity, the material achieved removal rates of up to 85%, 80%, and 78% for low-concentration benzene, toluene, and xylene, respectively. A detailed analysis of factors such as particle size and light exposure provides strong evidence for further development of indoor air purification technology.

【Keywords】 Nano TiO₂; Photocatalyst; Indoor VOCs; Removal efficiency; Influencing factors

引言

室内挥发性有机化合物(VOCs)来源广泛,家具、装修材料等持续释放甲醛、苯系物等有害物质,长期接触易引发呼吸道疾病甚至癌症。纳米 TiO₂光触媒凭借高催化活性、化学稳定性强等特点,成为室内空气净化领域的研究焦点。其在复杂室内环境中对 VOCs 的实际去除效能,以及不同条件下的作用机制尚未明晰。深入探究纳米 TiO₂光触媒材料对室内 VOCs 的去除效能,对保障人居健康、优化空气净化技术意义深远。

1 实验设计

搭建室内 VOCs 净化模拟实验平台是开展本次研究的基础工作,该平台由气体发生系统、反应舱和检测系统共同构成。气体发生系统运用动态配气法,这种方法通过精确控制各类气体流量,能够对苯、甲苯、二甲苯等常见 VOCs 气体浓度进行精准调控。低浓度时,可模拟日常室内空气略有污染的状态,而高浓度则可

模拟刚装修完,甲醛等有害物质大量挥发的极端情况,为研究不同污染程度下光触媒材料的性能提供多样环境。

反应舱作为实验的核心区域,是一个精心打造的密闭空间,其内部构造经过了严谨设计。其中,蜂窝状陶瓷载体上均匀负载着纳米 TiO₂光触媒材料。蜂窝状的独特结构设计,使得载体拥有远超常规结构的比表面积。这种大比表面积特性,为光触媒材料提供了极为广阔的附着与作用空间^[1]。在实际反应进程中,大量的 VOCs 气体能够通过蜂窝结构的孔隙,顺畅且充分地扩散至光触媒表面,从而实现与光触媒的充分接触。光触媒的活性位点得以最大程度利用,催化反应得以在更高效的环境中进行,极大地提升了材料催化性能的发挥程度,确保反应以较高效率推进。

检测系统以气相色谱仪为核心,搭配高精度气体采样装置,二者协同工作,实时监测反应舱内 VOCs 浓

度变化。采样间隔精确到分钟级,这样的精细设置确保了采集到的数据具有高度连续性与准确性。在实验设计中,还设置了多组对照实验,涵盖不同光照强度(1000 - 8000lux)、温度(15 - 35°C)、湿度(20% - 80%)条件^[2]。不同光照强度模拟室内自然采光不同时段,温度和湿度也贴合室内四季以及不同地域环境的常见范围,通过系统研究这些因素,能够全面剖析其对纳米 TiO₂光触媒材料去除 VOCs 效能的影响。

在实验材料准备阶段,采用溶胶 - 凝胶法制备纳米 TiO₂光触媒材料。该方法通过调节原料配比、反应温度和时间,对材料粒径进行精准控制,使其在 20 - 50nm 范围内。合理的粒径大小对于光触媒性能至关重要,直接影响光催化活性。将制备好的材料均匀负载于蜂窝状陶瓷载体表面后,再经高温煅烧处理。高温煅烧不仅能增强材料与载体的结合力,避免在实验过程中材料脱落影响实验结果,还能进一步优化材料微观结构,为后续实验提供性能稳定的光触媒样品,确保实验数据的可靠性。

2 效能分析

在光照强度 5000lux、温度 25°C、湿度 50%的标准实验条件下,纳米 TiO₂光触媒材料对低浓度(50μg/m³)的苯、甲苯、二甲苯展现出优异的去除能力。实验数据显示,反应 6 小时后,苯的去除率可达 85%以上,甲苯和二甲苯去除率分别为 80%和 78%。在这样的环境下,光触媒材料能充分吸收光能,光子能量被材料吸收后,激发产生大量光生电子 - 空穴对。这些光生载流子迅速迁移到材料表面,空穴具有强氧化性,可将吸附在材料表面的水分子氧化为具有强氧化性的羟基自由基,电子则与氧气反应生成超氧自由基^[3]。两种自由基协同作用,能够有效氧化分解 VOCs,将其转化为二氧化碳和水等无害物质,从而实现高效净化。

随着 VOCs 初始浓度增加,纳米 TiO₂光触媒材料的去除效能却呈下降趋势。当苯浓度提升至 200μg/m³时,6 小时后去除率降至 70%。这主要是因为高浓度的 VOCs 气体分子大量占据光触媒表面有限的活性位点,使得后续的 VOCs 分子难以吸附到活性位点上进行反应。光生载流子在迁移过程中,由于活性位点被占据,与 VOCs 分子发生有效反应的几率降低,抑制了光生载流子的迁移与反应,导致材料催化效率降低^[4]。此外高浓度 VOCs 氧化分解产生的中间产物,如一些有机小分子,可能会吸附在材料表面,进一步阻碍后续反应的进行,从而使得整体去除率下降。

湿度对纳米 TiO₂光触媒材料去除 VOCs 效能的影

响呈现出复杂的非线性特征。实验发现,在适度湿度(40% - 60%)区间内,水分子在材料表面形成一层薄薄的水膜。这层水膜在光催化反应中起到了积极作用,它有助于光生载流子的分离,减少电子与空穴的复合几率,同时为光生空穴提供更多可反应的水分子,从而促进羟基自由基的生成,增强对 VOCs 的氧化反应。而当湿度低于 20%时,材料表面过于干燥,缺乏水分子参与反应,光催化反应的中间步骤难以顺利进行,导致材料对 VOCs 的吸附与催化能力降低。当湿度高于 80%时,过多的水分在材料表面形成水滴,阻碍了光的传播与吸收,且可能稀释 VOCs 气体在材料表面的浓度,同样影响光触媒表面活性位点的分布,致使去除率下降。

3 影响因素

纳米 TiO₂光触媒材料的粒径大小对其光催化活性有着直接且显著的影响。当粒径从 50nm 减小至 20nm 时,材料的比表面积会显著增大。根据几何原理,粒径越小,相同质量材料所具有的表面积越大。这意味着更多的活性位点得以暴露在材料表面,为光催化反应提供了更多的反应场所。与此粒径减小还使得光生电子-空穴对的复合几率降低^[5]。在大粒径材料中,光生载流子迁移到表面参与反应的路程较长,容易在途中发生复合,而小粒径材料缩短了这一迁移距离,提高了载流子参与反应的几率,从而显著提升对 VOCs 的去除效能。实验表明,粒径为 20nm 的材料在相同条件下,对苯的去除率比 50nm 材料高出 15%,这一数据充分体现出纳米级尺寸效应在光催化领域的重要性,也为优化材料性能提供了明确的方向。

光照波长与强度是决定纳米 TiO₂光触媒反应效率的关键因素。TiO₂的禁带宽度约为 3.2eV,这一物理特性决定了它只能吸收波长小于 387nm 的紫外光。在本次实验中,采用了不同波长的紫外光源进行测试,实验结果发现,在 365nm 波长光照下,材料产生的光生载流子数量最多^[6]。这是因为 365nm 波长的光子能量与 TiO₂的禁带宽度匹配度较高,能够更有效地激发电子跃迁,产生更多的光生电子 - 空穴对,进而对 VOCs 的去除效果最佳。光照强度增强时,单位时间内照射到材料表面的光子数量增多,能够提高光生载流子的产生速率。过高的光照强度会导致光生载流子复合加剧,因为过多的载流子在短时间内产生,它们之间相互碰撞复合的几率增大,反而降低了参与光催化反应的载流子数量,最终导致催化效率降低。

空气中氧气和水的含量也会对纳米 TiO₂光触媒的

反应进程产生重要影响。氧气在光催化反应中扮演着电子受体的角色,光生电子迁移到材料表面后,与氧气发生还原反应,生成超氧自由基等活性氧物种。这一过程不仅消耗了光生电子,促进了光生空穴与 VOCs 的氧化反应,还为整个光催化反应提供了更多的氧化性物种。水分子在光触媒表面同样具有重要作用,它可为光触媒表面提供羟基自由基。在光照条件下,光生空穴将水分子氧化生成羟基自由基,羟基自由基具有极强的氧化性,是光催化氧化 VOCs 的主要活性物种之一。实验显示,在富氧和适度湿度环境下,纳米 TiO₂ 光触媒材料对 VOCs 的去除效率比缺氧干燥环境提高 20% - 30%。这清晰地表明,合适的氧气和水含量对于维持高效的光催化反应至关重要,在实际应用中需要充分考虑环境中这两种物质的含量对净化效果的影响。

4 结果总结

纳米 TiO₂ 光触媒材料在室内 VOCs 去除领域展现出了巨大的潜力。在特定条件下,能够高效分解苯、甲苯、二甲苯等多种常见污染物,为改善室内空气质量提供了一种可行的技术方案^[7]。通过实验研究发现,其在标准条件下对低浓度污染物的高去除率,证明了该材料在日常轻度污染室内环境中的净化能力。在实际应用场景中,其效能受到材料自身特性、环境条件等多种因素的制约。材料粒径大小、光照波长与强度以及环境中氧气和水的含量等因素,都会显著影响光触媒材料的催化活性和净化效果。

基于以上研究结果,未来研究可从多个方向深入开展。一方面,可以通过掺杂改性、复合其他半导体材料等方式,优化纳米 TiO₂ 光触媒的光谱响应范围与催化活性。通过掺杂金属离子或非金属元素,改变 TiO₂ 的电子结构,使其能够吸收更宽波长范围的光,提高对可见光的利用效率。另一方面,结合人工智能算法,精准调控净化设备运行参数,以适应复杂多变的室内环境。利用人工智能强大的数据处理和学习能力,根据室内实际的污染浓度、温湿度、光照等条件,实时调整净化设备的运行参数,如光照强度、通风量等,实现净化效果的最大化。加强与建筑材料的协同研究,开发具有自净化功能的新型建材^[8]。将纳米 TiO₂ 光触媒材料与建筑材料相结合,使建筑材料在构建室内空间的具备自主净化空气中 VOCs 的能力,推动室内空气净化技

术向高效化、智能化发展,为营造健康舒适的居住环境提供有力支撑。

结语

纳米 TiO₂ 光触媒材料在室内 VOCs 净化上展现出良好性能,在特定温湿度、光照条件下,对苯、甲苯等污染物有显著去除效果。不过,材料自身特性与复杂环境因素限制其广泛应用。未来应聚焦材料改性创新,拓宽光谱响应;借助智能技术优化设备运行;推动与建材产业融合,开发自净化产品,持续提升纳米 TiO₂ 光触媒材料的实用性与高效性,为改善室内空气质量提供更优解决方案。

参考文献

- [1] 孙孜涵,王耕,唐鹏凯,等.小客车室内异味 VOCs 的治理及健康风险评估[J/OL].中国环境科学,1-9[2025-04-19].
- [2] 王文君,刘瑞鑫,王军,等.浅析二氧化钛材料可见光降解室内 VOCs 的研究进展[J/OL].化工进展,1-17[2025-04-19].
- [3] 张嘉瑞,马正升,何诗涵.纳米 TiO₂ 光触媒材料的制备及其改性的研究进展[J].印染,2024,50(11):70-75+79.
- [4] 李方伟,崔龙,程燕,等.植物去除室内挥发性有机物机理研究进展[J].地球环境学报,2024,15(04):583-595.
- [5] 陆剑峰.建筑室内挥发性有机物的污染特征及风险评价[J].中国住宅设施,2024,(05):116-118.
- [6] 杨明,孙杰,王金泽,等.金属有机框架及碳基材料在室内有机污染物控制中的研究进展[J].材料导报,2025,39(04):45-52.
- [7] 王雄,刘菊.洁净室内 AMC 治理方法研究[J].制冷与空调(四川),2024,38(01):148-154.
- [8] 宋晶璟,孙晓丹.光催化涂层净化室内 VOCs 研究进展[J].精细化工,2023,40(08):1679-1687.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS