

基于光催化的汽车尾气自收集降解技术

康宪章¹,赵之仲^{1*},隋明言²,梁浩³,薛军⁴,刘芝敏⁵

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 华设设计集团北京民航设计研究院有限公司, 北京 101300;
3. 山东鲁中公路建设有限公司, 山东 淄博 255086; 4. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014;
5. 济南金日公路工程有限公司, 山东 济南 250101

摘要:为分析光催化降解汽车尾气技术的关键指标,提高汽车尾气降解效率,以纳米 TiO_2 为催化剂,设计室内自收集式汽车尾气降解试验,以流动的汽车尾气为试验源,NO 为指标气体,分析不同纳米 TiO_2 质量浓度、尾气流速、温度及紫外线辐照度对汽车尾气中 NO 降解效率的影响。试验结果表明:汽车尾气中 NO 的降解效率随纳米 TiO_2 质量浓度和尾气流速的增大先增大后减小;纳米 TiO_2 的质量浓度为 40 g/m^3 ,尾气流速为 2.5 m/s 时,NO 的降解效率最大;室内自收集式汽车尾气降解试验受外界环境影响小,温度和紫外线辐照度小范围变化对 NO 降解效率影响较小。

关键词:纳米 TiO_2 ;光催化;汽车尾气;NO 降解

中图分类号:U414;U491.9⁺2

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)03-0099-05

引用格式:康宪章,赵之仲,隋明言,等.基于光催化的汽车尾气自收集降解技术[J].山东交通学院学报,2024,32(3):99-103.

KANG Xianzhang, ZHAO Zhizhong, SUI Mingyan, et al. Self-collection and degradation technology of automotive exhaust based on photocatalysis[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(3): 99-103.

0 引言

随乘用车保有量的持续增大,汽车尾气已成为城市大气污染的重要因素之一^[1-2]。汽车尾气中主要污染物有 NO_x 、CO、 CO_2 、HC 和颗粒物(particulate matter, PM)等^[3],长期吸收会极大地损害人体器官,引发恶性肿瘤等疾病^[4-5]。高效治理汽车尾气、减少污染物排放、改善空气质量对提高居民生活质量、打造宜居城市至关重要。

车辆限行等措施仅在短期内可有效控制汽车尾气^[6],推广新能源汽车、改善发动机性能及应用机内净化技术等措施^[7-8]可在源头解决部分尾气危害,但燃油车的高保有量导致汽车尾气污染难题无法得到有效解决。近年来,光催化降解汽车尾气技术成为学者的研究重点之一^[9-10]。在制备高催化活性纳米 TiO_2 及提高光催化反应效率等方面,魏慧杰^[11]采用不同钛源和方法制备不同形貌的纳米 TiO_2 结构,通过光催化制氢和光催化降解四环素试验筛选光催化活性最好的 TiO_2 纳米棒;杨振等^[12]采用阳极氧化法制备 TiO_2 纳米棒以提高光催化效率;饶培文等^[13]通过比较不同分散剂对纳米 TiO_2 分散液的分散作用,

收稿日期:2023-10-13

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2023B05-03,2023B92-01,2023B25,2022B102);新型道路材料国家工程研究中心开放课题(202400000114);山东省高速公路技术和安全评估省级重点实验室开放性课题(SH202103)

第一作者简介:康宪章(1998—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:22107044@stu.sdjtu.edu.cn。

* 通信作者简介:赵之仲(1978—),男,山东德州人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为路基路面工程、BIM 技术等,E-mail:zhaozhizhong@sdjtu.edu.cn。

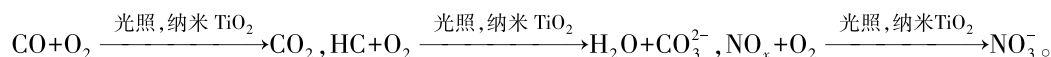
研究分散剂对纳米 TiO_2 的光催化降解效率的影响。在光催化降解汽车尾气道路材料方面,宁雪莲^[14]以纳米 TiO_2 为光催化材料制备光催化透水混凝土,在不同光照条件下测定其降解汽车尾气的能力;黄海舟等^[15]通过沥青混合料尾气降解试验分析纳米 TiO_2 降解汽车尾气的规律,并介绍国内外工程应用实例;李梦晨等^[16]建立沥青路面降解汽车尾气试验全过程的质量控制指标体系。在汽车尾气降解效果测试设备方面,谭忆秋等^[17]解决现有试验测试设备不具备光催化反应所需光条件,测试设备使用范围受限的问题;牡丹丰等^[18]通过计算机辅助测试系统检测和分析降解材料对汽车尾气有害成分的降解效能。已有文献多探究静态降解汽车尾气模式,对流动状态下汽车尾气的降解效率研究较少。

本文设计室内自收集式汽车尾气降解装置,以纳米 TiO_2 为催化剂,采用动态检测法,保持汽车尾气持续供应,通过室内试验研究尾气的流动速度、光催化剂浓度等因素对汽车尾气降解效率的影响,为提高光催化降解汽车尾气效率提供参考。

1 室内自收集式汽车尾气降解试验设计

1.1 纳米 TiO_2 光催化降解汽车尾气机理

在光照作用下,纳米 TiO_2 晶体结构中的电子被光能激发至价带,产生电子-空穴,在纳米 TiO_2 晶格中分离。电子被激发到导带形成自由电子,空穴留在价带上,自由电子和空穴可与吸附在纳米 TiO_2 表面或周围的分子发生反应,电子还原氧分子或氧化剂,产生活性的氢氧自由基。汽车排出的尾气与纳米 TiO_2 接触,在光源作用下,纳米 TiO_2 表面产生有极强氧化能力的氢氧自由基,将汽车尾气中的 CO 、 HC 和 NO_x 分别氧化为 CO_2 、 H_2O 和 NO_3^- ,反应原理^[19-20]为:



1.2 试验装置及设备

在试验装置中设置主动控制变量部件,可改变汽车尾气流动速度与光催化剂浓度,室内自收集式汽车尾气降解装置如图1所示。汽车尾气由进气管1进入,在集气箱中沉积到稳定浓度后,由风量控制器控制尾气,经进气管2进入反应室,开启紫外线高压汞灯后,标志试验开始,尾气经反应室降解后,通过排气管排出。

选取 MTI-2081 型分散液,将纳米 TiO_2 粉体分散在水相介质中,形成高度分散化、均匀化和稳定化的透明液体,其氧化性能强,无毒无害,化学稳定性良好;选取 PLT300-NO 泵吸式气体检测仪,仪器监测数据精确;SWEVY SW-6036 风速仪记录风速、摄氏温度、湿度,检测试验环境;选取 GY250 紫外线高压汞灯,主要波段为 315~450 nm,主波长为 365 nm。

1.3 试验条件及流程

根据农业数据大系统数据和全国各地光照强度,确定本试验紫外线辐照度为 20.03 W/m^2 ,紫外线高压汞灯高度为 45 cm。摄氏温度为 $0 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,纳米 TiO_2 的催化速率随温度上升而增大,超过 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,摄氏温度对纳米 TiO_2 催化剂的影响较小^[21]。根据试验场所的实际情况及试验中温度控制的精准性要求,本试验设置摄氏温度为 $25 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 。结合气象局统计的风速及国内外关于光催化试验中纳米 TiO_2 质量浓度的研究^[22-23],设定尾气流动速度分别为 2.0 、 2.5 、 3.0 、 4.0 、 5.0 、 6.0 m/s ;纳米 TiO_2 质量浓度分别为 30 、 35 、 40 、 45 、 50 g/m^3 。

以汽车尾气中的典型污染物 NO 为指标气体,采用流动性尾气进行光催化降解效率试验,需严格控制环境因素对试验的干预,具体试验流程为:1)将试验车辆的排气管与尾气收集箱相连,启动试验车辆,

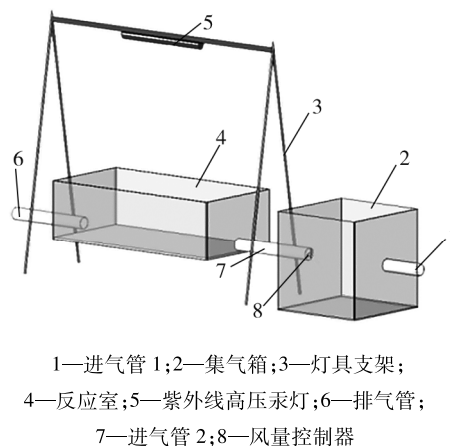


图1 室内自收集式汽车尾气降解装置

稳定在空挡怠速工况,让尾气充满整个试验装置,排出仪器内部原有空气;2)在反应室内均匀喷洒纳米 TiO_2 分散液;3)检测调整进气管口处的初始流速,控制汽车尾气流速达到试验要求;4)通过紫外线高压汞灯控制试验的开始与结束,开启紫外线高压汞灯开始光催化过程,关闭紫外线高压汞灯结束光催化过程;5)将 NO 空气检测仪分别放置在反应室的进气口与排气口处,实时观测 NO 的体积分数,待其相对恒定时,记录观测数值。

2 试验结果分析

2.1 纳米 TiO_2 质量浓度对尾气中 NO 降解效率的影响

不同纳米 TiO_2 质量浓度、不同尾气流速 v 下汽车尾气中 NO 降解效率如图2所示。由图2可知:不同尾气流速下,随纳米 TiO_2 质量浓度的增大, NO 降解效率先增大后减小;纳米 TiO_2 浓度较小时,不同尾气流速下 NO 降解效率均较小,原因是纳米 TiO_2 质量浓度较小时,无法起到有效的催化作用;纳米 TiO_2 质量浓度为 40 g/m^3 时,不同尾气流速下 NO 降解效率均最大;纳米 TiO_2 质量浓度大于 40 g/m^3 时,光催化剂分子团聚,阻碍部分 NO 分子结合, NO 的降解效率减小。

2.2 尾气流速对尾气中 NO 降解效率的影响

不同尾气流速、不同纳米 TiO_2 质量浓度 $\rho(\text{TiO}_2)$ 下, NO 降解效率如图3所示。由图3可知:不同纳米 TiO_2 质量浓度下,尾气流速为 $2.0\sim 2.5\text{ m/s}$ 时 NO 降解效率随尾气流速的增大而增大;尾气流速为 2.5 m/s 时,降解效率最大,原因是随尾气流速的增大,反应室内部分子的活性提高, NO 可充分接触光催化剂,提高降解效率;尾气流速为 $2.5\sim 6.0\text{ m/s}$ 时, NO 降解效率随尾气流速的增大而持续减小,原因是尾气流速过大会阻碍 NO 与纳米 TiO_2 的接触,导致降解效率减小。

2.3 温度对尾气中 NO 降解效率的影响

尾气流速为 2.5 m/s ,纳米 TiO_2 质量浓度为 40 g/m^3 时, NO 降解效率最佳,以此组合为前提,分析温度对尾气中 NO 降解效率的影响。通过外置采暖设备对试验区域升温,测得 $25\sim 26$ 、 $27\sim 28$ 、 $29\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 下尾气中 NO 的降解效率分别为 68.4% 、 69.1% 、 69.4% ,适当升温后,光催化降解效率增大,但增幅较小,对 NO 的降解效率影响较小。

2.4 紫外线辐照度对尾气中 NO 降解效率的影响

尾气流速为 2.5 m/s ,纳米 TiO_2 质量浓度为 40 g/m^3 时,改变光源的架设高度,分析紫外线辐照度对尾气中 NO 降解效率的影响,结果如表1所示。由表1可知:随光源的架设高度增大,紫外线辐照度降低, NO 降解效率减小;光源的架设高度从 45 cm 降至 35 cm 时, NO 降解效率提升 0.6% ;光源的架设高度从 45 cm 升至 55 cm 时, NO 降解效率降低

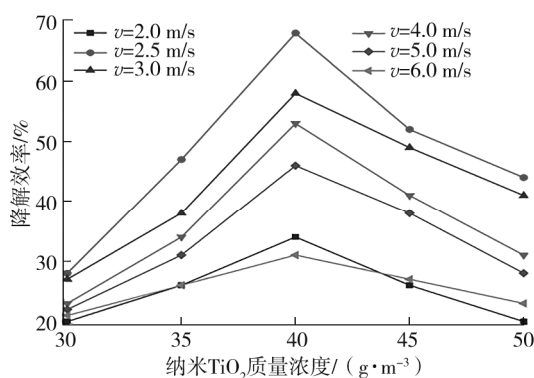


图2 不同纳米 TiO_2 质量浓度下 NO 降解效率

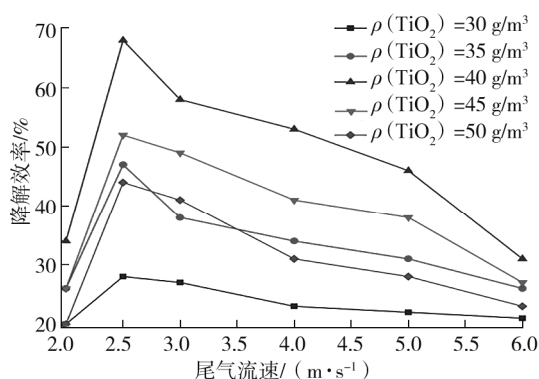


图3 不同尾气流速下 NO 降解速率

表1 紫外线辐照度对 NO 降解效率的影响

光源高度/cm	紫外线辐照度/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	降解效率/%
35	22.40	69.0
40	21.22	68.6
45	20.03	68.4
50	18.60	67.9
55	17.54	67.5

0.9%。整体上紫外线辐照度对尾气中 NO 降解效率影响较小。

3 结论

为分析光催化降解汽车尾气技术的关键指标,设计室内自收集式汽车尾气降解装置进行室内模拟试验,分析不同纳米 TiO_2 质量浓度、尾气流速、温度及光照对汽车尾气中 NO 降解效率的影响。

1)在相同尾气流速下,随纳米 TiO_2 质量浓度的增大,NO 降解效率先增大后减小,纳米 TiO_2 质量浓度为 40 g/m^3 时汽车尾气的降解效率最大。

2)纳米 TiO_2 质量浓度不变时,NO 降解效率随尾气流速的增大而先增大后减小,尾气流速为 2.5 m/s 时 NO 降解效率最大。

室内自收集式汽车尾气降解技术受外界环境影响小,温度和紫外线辐照度的变化范围较小,对汽车尾气中 NO 降解效率影响较小,降解效果较稳定。下一步可研究外界环境因素对光催化降解汽车尾气效率的影响。

参考文献:

- [1] 李香,吴水平,姜炳棋,等. 2015~2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学,2022,43(11): 4914-4923.
- [2] 石晓兰,宗政,彭辉,等. 近 10 年华北背景大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属健康风险及污染来源的变化[J]. 环境科学,2023,44(10):5335-5343.
- [3] 李文博. TiO_2 封层式催化分解尾气型沥青路面材料及其路用性能研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2017.
- [4] 谢杰光,匡亚川. 纳米 TiO_2 光催化技术及其在降解汽车尾气中的应用[J]. 材料导报,2012,26(15):141-145.
- [5] 周子航,邓也,谭钦文,等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. 环境科学,2018,39(12):5344-5358.
- [6] 张衡,王庆龙. 中国汽车尾气控制政策的减排效果研究[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(5):98-109.
- [7] 刘忠肃,陈雨庭,刘晓红,等. 新能源汽车燃料电池研究进展[J]. 山东交通学院学报,2023,31(3):15-21.
- [8] MOURAD M, MAHMOUD K R M, NOURELDEEN E H. Improving diesel engine performance and emissions characteristics fuelled with biodiesel[J]. Fuel, 2021,302:121097.
- [9] GÓRNIK A, JANICKA A, MICHNIEWICZ D, et al. Researches on a photocatalytic device for toxic hydrocarbons removal from IC engine exhausts[J]. Combustion Engines, 2019,179(4):151-155.
- [10] 马晓佳,唐学静,靳凤先,等. 二氧化钛基材料光催化降解 VOCs 的研究进展[J]. 工程科学学报,2023,45(4): 590-601.
- [11] 魏慧杰. 纳米 TiO_2 基光催化剂制备及光催化活性研究[D]. 北京:北京化工大学,2023.
- [12] 杨振,杨阳,王晓慧,等. 二氧化钛纳米管的制备和生长机制[J]. 云南冶金,2023,52(增刊1):100-104.
- [13] 饶培文,戴建斌,彭小晋,等. 浅析纳米二氧化钛光催化降解效率的影响因素[J]. 佛山陶瓷,2023,33(1):82-85.
- [14] 宁雪莲. TiO_2 光催化水泥基材料降解汽车尾气研究[J]. 建筑施工,2023,45(5):1024-1028.
- [15] 黄海舟,武轶琨,王俊天,等. 光催化降解尾气环保型路面研究综述[J]. 山东交通科技,2023(1):110-113.
- [16] 李梦晨,赵之仲,韩斐,等. 可降解汽车尾气的沥青路面质量控制指标体系[J]. 山东交通学院学报,2022,30(1): 79-87.
- [17] 谭忆秋,魏鹏,周纯秀. 用于测试新材料降解尾气性能的试验装置:CN101162222B[P]. 2008-04-16.
- [18] 牡丹丰,郭秀荣,杨旭. 可移动式汽车尾气降解材料测试室:CN202735318U[P]. 2013-02-13.
- [19] 刘浪,解伟,金娇,等. 纳米 TiO_2 基催化剂在环保功能路面应用的研究进展[J]. 中国材料进展,2020,39(1):78-83.
- [20] 孙立军,徐海铭,李剑飞,等. 纳米二氧化钛处治汽车尾气效果与应用方法的研究[J]. 公路交通科技,2011,28(4): 153-158.
- [21] 钱春香,赵联芳,付大放,等. 温湿度和光强对水泥基材料负载纳米 TiO_2 光催化氧化氮氧化物的影响[J]. 环境科学学报,2005(5):623-630.
- [22] 中国气象局风能太阳能中心. 2022 年中国风能太阳能资源年景公报[EB/OL]. (2023-04-21)[2023-09-03]. https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gkqr/qxbg/202304/t20230421_5454513.html.

[23] 李文俊. 纳米二氧化钛光催化透水混凝土降解汽车尾气性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.

Self-collection and degradation technology of automotive exhaust based on photocatalysis

KANG Xianzhang¹, ZHAO Zhizhong^{1*}, SUI Mingyan², LIANG Hao³,
XUE Jun⁴, LIU Zhimin⁵

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Beijing Civil Aviation Design and Research Institute Co., Ltd., China Design Group, Beijing 101300, China;

3. Shandong Luzhong Highway Construction Co., Ltd., Zibo 255086, China;

4. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;

5. Jinan Kingyue Highway Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, China

Abstract: In order to analyze the key indicators of photocatalytic degradation of automobile exhaust technology and improve the efficiency of automobile exhaust degradation, nano-TiO₂ is used as a catalyst, and an indoor self-collection automobile exhaust degradation test is designed. Flowing automobile exhaust is used as the test source, and NO is used as the index gas to analyze the effects of different nano-TiO₂ mass concentrations, exhaust flow rates, temperatures, and ultraviolet irradiance on the degradation efficiency of NO in automobile exhaust. The experimental results show that the degradation efficiency of NO in automobile exhaust increases first and then decreases with the increase of nano-TiO₂ mass concentration and exhaust flow rate; The degradation efficiency of NO is maximum when the mass concentration of nano-TiO₂ is 40 g/m³ and the exhaust flow rate is 2.5 m/s; The indoor self-collecting automobile exhaust degradation test is less affected by the external environment, and the temperature and ultraviolet irradiance has little effect on the degradation efficiency of NO.

Keywords: nano-TiO₂; photocatalysis; automobile exhaust; NO degradation

(责任编辑:赵玉真)

(上接第98页)

and reinforcement ratio having a smaller influence, and steel bar strength having the smallest influence; the theoretical calculation results of the maximum ultimate axial force and maximum ultimate bending moment are both greater than the numerical analysis results; the error between the theoretical calculation results and the numerical analysis results of the maximum ultimate bending moment is bigger than that of maximum axial force, the former is approximately 10%, while the latter is approximately 5%.

Keywords: eccentrically loaded RC column; symmetric reinforcement; N_u - M_u curve; parameter analysis; numerical analysis

(责任编辑:王惠)