综述

改性 TiO_2 在室内环境净气领域的研究综述

刘宇鑫[1], 张文彬[1], 丛可斌[2], 刘俐彤[3], 李天泽[4], 孙嘉焘[5], 罗琬淇[1],
李昊轩[6], 宋明杰[1], 赵东杨[6], 刘世民[1,*], 张志华[1]

(1. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 大连 116028; 2. 大连交通大学 远交大交通学院, 大连 116028; 3. 大连交通大学 经济管理学院, 大连 116052; 4. 大连交通大学 轨道智能工程学院, 大连 116052; 5. 大连交通大学 基础部, 大连 116052; 6. 大连交通大学 交通工程学院, 大连 116028)

摘要: 随着现代建筑密闭性的增强及装修材料的广泛使用, 室内空气质量已成为影响人体健康的关键环境因素。二氧化钛(TiO_2)光催化技术因其环境友好、高效、稳定等特性, 被认为是解决各类室内空气净化问题最具前景的技术之一。然而, 纯 TiO_2 禁带宽度较大(约 3.2 eV), 仅能利用紫外光(波长<387 nm), 且光生电子-空穴对的高复合率严重制约其实际性能。本文综述改性 TiO_2 在室内空气净化领域的最新研究进展。研究人员通过掺杂、构建异质结、引入氧空位等改性策略, 从多方面提升材料的光催化性能, 以拓展光响应范围至可见光区、降低载流子复合率、提高活性物种生成效率, 从而加速其向实际应用的转化。尽管如此, 目前改性 TiO_2 及其复合材料大多仍处于实验室研究阶段, 距离市场化应用尚有较大差距。

关键词: 光催化; 改性二氧化钛; 室内空气净化; 挥发性有机化合物分解

中图分类号: O643.36　　**文献标志码:** A

DOI: 10.3724/jfmd.2511092　　CSTR: 32180.14.jfmd.2511092

A review of the research on modified TiO_2 in indoor air purification

LIU Yuxin[1], ZHANG Wenbin[1], CONG Kebin[2], LIU Litong[3], LI Tianze[4], SUN Jiatao[5], LUO Wanqi[1],
LI Haoxuan[6], SONG Mingjie[1], ZHAO Dongyang[6], LIU Shimin[1,*], ZHANG Zhihua[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. FESTU Transport Institute, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 3. School of Economics and Management, Dalian Jiaotong University, Dalian 116052, China; 4. School of Railway Intelligent Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116052, China; 5. Department of Foundational Courses, Dalian Jiaotong University, Dalian 116052, China; 6. School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: With the increasing enclosure of modern buildings and the widespread use of decorative materials, indoor air quality has become a critical environmental factor affecting human health. Titanium dioxide (TiO_2) photocatalytic technology is regarded as one of the most promising approaches for

收稿日期: 2025−11−13;　　**修订日期:** 2026−03−10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52572022); 辽宁省高校基本科研业务费专项资金(No. LJ212410150041); 辽宁省应用基础研究计划(No. 2025JH2/101300042)

通信作者: *lsm@djtu.edu.cn

addressing diverse indoor air purification challenges owing to its environmental compatibility, high efficiency, and stability. However, the wide bandgap (approximately 3.2 eV) of pure TiO_2 restricts its photoactivity to ultraviolet light (wavelength <387 nm), and the rapid recombination of photogenerated electron-hole pairs significantly hinders its practical performance. This article reviews recent advances in modified TiO_2 for indoor air purification. Through modification strategies, including metal and non-metal doping, heterojunction construction, and oxygen vacancy introduction, the material's fundamental properties are enhanced across multiple dimensions: the optical response is extended into the visible-light region, charge carrier recombination is suppressed, and the generation efficiency of reactive species is improved, thereby accelerating the transition toward real-world applications. Nevertheless, most modified TiO_2 materials and their composites remain at the laboratory research stage, and a considerable gap persists before commercial deployment.

Key words: photocatalysis; modified TiO_2; indoor air purification; decomposition of volatile organic compounds

0 引言

近年来，随着工业化进程的加快，室内（住宅、办公场所、学校、医院等）及与工业相关的密闭空间（车间操作室、仓储辅助区、生产配套休息室等）的空气污染问题日益凸显。民用室内污染具有污染源分散、污染物浓度低且成分复杂、人体暴露时间长、健康危害隐蔽的特征[1]，工业相关密闭空间则多呈现污染物浓度较高、组分相对集中的特点[2]。尽管二者场景不同、污染特征各异，但均对人体健康构成威胁，因此，解决这些场所中的空气净化问题具有重要的现实意义，亟需高效、环保的技术方案。

目前，传统室内空气净化技术主要包括物理吸附、燃烧、生物处理及膜分离等，但其均存在一定的局限：物理吸附技术易饱和[3]；燃烧技术能耗高[4]；生物处理技术效率低且稳定性不足[5]；膜分离技术成本高且对低浓度污染物适应性差[6]。相比之下，光催化技术凭借环境友好、无二次污染及净化速率高等优势，已成为室内空气净化的核心研究方向。

TiO_2 因其低成本、高活性、性质稳定以及无二次污染等特性而被广泛用作光触媒[7]，在室内空气治理等领域具有广阔的应用前景。然而，纯 TiO_2 禁带宽度较大，且受激发时产生的电子-空穴对易复合，导致光催化效率降低，制约了其进一步应用[8]。通过采用掺杂、构建异质结等改性策略，可有效增强 TiO_2 材料在可见光区域的吸收能力，降低电子与空穴的复合率，从而显著提升其光催化性能[9]。

本文系统综述改性 TiO_2 的近期研究进展，包括净化性能、改性机制及当前面临的挑战，旨在为其市场化转化提供理论参考。

1 TiO_2 光催化原理

光催化技术的核心原理在于半导体材料的能带激发与电荷转移过程。本节系统阐述 TiO_2 的光催化原理及通过改性提升性能的途径，即调控能带结构与抑制电荷复合，为后续探讨改性 TiO_2 在室内空气净化中的应用提供理论支撑。

1.1 纯 TiO_2 的光催化原理

目前，纯 TiO_2 存在 3 种晶体形态：锐钛矿型（anatase）、金红石型（rutile）和板钛矿型（brookite），其中常见的 TiO_2 纳米材料主要为锐钛矿型、金红石型。此外，还包括具有特殊结构的介孔 TiO_2（mesoporous TiO_2）[10]。不同晶型 TiO_2 的晶体结构如图 1 所示。

TiO_2 在光激发作用下会生成光生电子-空穴对，进而触发一系列复杂的氧化还原反应（图 2）。具体而言，当具有适宜能带结构的 TiO_2 受到能量高于其带隙的光照射时，价带中的电子吸收光子能量跃迁至导带，从而在价带中产生光生空穴，同时在导带中形成光生电子。这些光生电子和空穴迁移至光催化剂表面，与吸附于表面的 H_2O 和 O_2 发生反应，生成具有强氧化能力的羟基自由基（·OH）和

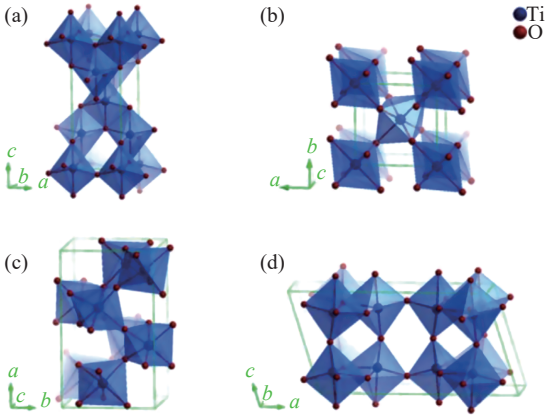


图 1　不同晶型 TiO_2 的晶体结构[10]。(a)锐钛矿型; (b)金红石型; (c)板钛矿型; (d)特殊结构介孔 TiO_2

Fig. 1 Crystal structures of different TiO_2 crystal types[10]. (a) Anatase; (b) rutile; (c) brookite; (d) mesoporous titanium dioxide

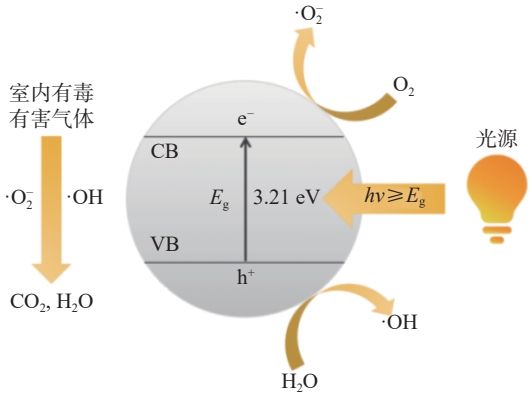


图 2　TiO_2 光催化原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of TiO_2 photocatalytic principle

超氧自由基($\cdot O_2^-$)等活性氧物种(reactive oxygen species, ROS)。这些 ROS 可与空气中的有机气态污染物发生氧化还原反应, 从而实现污染物的降解或将污染物转化为无害物质[11]。

整个光催化过程如下[12]:

$$TiO_2 + h\nu(UV) \rightarrow TiO_2(e^-) + TiO_2(h^+) \quad (1)$$

$$TiO_2(h^+) + H_2O \rightarrow TiO_2 + H^+ + \cdot OH \quad (2)$$

$$TiO_2(h^+) + OH^- \rightarrow TiO_2 + \cdot OH \quad (3)$$

$$TiO_2(e^-) + O_2 \rightarrow TiO_2 + \cdot O_2^- \quad (4)$$

$$\cdot O_2^- + H^+ \rightarrow \cdot OH \quad (5)$$

式中, $h\nu$(UV) 表示紫外线(ultraviolet, UV)光子的能量, h 为普朗克常数, ν 为光的频率; e^-表示电子; h^+表示空穴, 即半导体中因电子缺失而形成的带正电位置。

总体而言, 纯 TiO_2 存在两大核心局限: (1)宽带隙(约 3.2 eV)导致其仅能利用紫外光(波长< 387 nm), 在室内可见光环境下光催化效率极低; (2)光生电子-空穴对复合率高, 量子效率低, 严重制约其实际应用性能。

1.2　改性 TiO_2 的光催化原理

合成改性 TiO_2 纳米材料的主要方法包括表面改性、缺陷工程、掺杂改性以及异质结构建[13]。然而, 无论采用何种合成策略, 其核心逻辑均在于通过调控能带结构与电荷传输路径, 突破禁带宽度大与电子-空穴复合率高的限制。一方面, 通过改性降低光激发能量阈值, 将光响应范围拓展至可见光区, 从而提升太阳能利用率; 另一方面, 构建载流子捕获位点或分离通道, 抑制电子-空穴复合, 延长载流子寿命, 最终实现表面活性、稳定性及分散性的协同增强[14], 显著提升光催化性能。此外, 采用上述 4 种改性策略制备的 TiO_2 纳米材料在光催化机理方面具有共性, 即通过改性手段同时实现光响应范围的拓展与电子-空穴对复合的抑制, 进而提高光催化效率[15-16]。

2　改性 TiO_2 的室内净气性能

与纯 TiO_2 相比, 改性 TiO_2 的性能优势显著, 其主要应用体现在以下方面。

2.1　挥发性有机污染物的降解

2.1.1　甲醛的降解

甲醛是室内装修和家具释放的典型污染物, 其长效降解依赖于改性 TiO_2 光催化性能的优化, 不同改性策略的应用效果及作用机理如下。

简垲琳等[17]研发的非金属 C 掺杂 TiO_2 触媒(C-TiO_2)在 30 ℃、初始质量浓度为 0.5 μg·L^{-1} 的甲醛体系中, 去除率达 95%, 较纯 TiO_2 提升 75 个百分点。该材料性能提升的核心机制在于碳改性对 TiO_2 电子结构的精准调控: 碳元素取代 TiO_2 晶格中的部分氧原子, 使禁带宽度由约 3.2 eV 缩小至 2.7 eV, 成功将光响应范围拓展至可见光区域; 同时, 碳掺杂引入的表面缺陷与羟基基团协同作用, 显著增强 O_2 分子的吸附与活化能力, 使 ROS 生成量较纯 TiO_2 增加 3 倍。上述双重结构优化共同推动甲

醛降解效率的大幅提升，如图 3 所示。该光触媒采用成本相对低廉的碳源进行改性，实现了与贵金属改性相当的净化性能，展现出显著的工业化应用潜力。

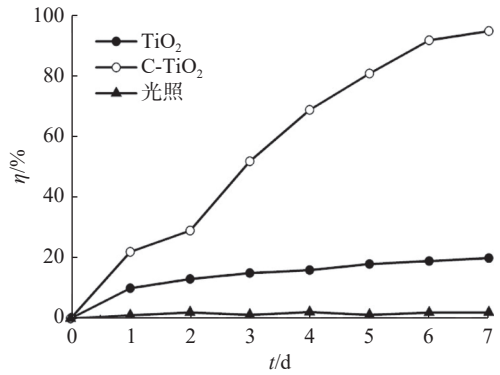


图 3　C-TiO_2 和 TiO_2 光触媒对甲醛的去除率(甲醛初始质量浓度为 0.5 μg·L^{-1})[17]

Fig. 3 Formaldehyde removal efficiency of C-TiO_2 and TiO_2 catalysts (initial mass concentration 0.5 μg·L^{-1})[17]

朱佳新等[18]的研究表明，非金属 N 掺杂 TiO_2 光触媒(N-TiO_2)在可见光(波长为 420 nm)照射下对甲醛的降解率达 82%，显著优于纯 TiO_2。N 原子的掺杂未改变 TiO_2 的晶体结构，而是在禁带中引入杂质能级。该能级不仅可作为电子捕获中心，抑制光生电子-空穴对的复合，还能降低光子激发所需能量，使材料在可见光下即可产生足量 ROS。尽管其降解效率略低于 Pt/TiO_2 异质结和 C-TiO_2，但 N-TiO_2 无需紫外光激发，更适配家居环境的自然光照条件。然而，在光照强度低于 100 lx 的昏暗环境中，其杂质能级激发效率下降，降解性能可能难以满足室内空气净化需求，体现出对光照条件的较强依赖性。

张伟等[19]采用铁离子(Fe^{3+})非均匀掺杂的改性纳米 TiO_2 光触媒，在实验舱中以黑光灯(功率 30 W×4 盏)和日光灯(功率 30 W×4 盏)为激发光源，照射喷涂于玻璃板载体的光触媒。结果表明：在黑光灯激发下，该光触媒对甲醛的降解效果显著，2 h 内降解率快速提升并趋于平缓，最终达 94.13%；日光灯激发下的降解率为 73.02%，效果稍弱。铁离子掺杂改性技术在黑光灯和日光灯两种光源条件下均能显著提升光触媒对甲醛的降解效率，为光催化技术在甲醛净化领域的应用提供了新的实验依据与理论支持。

2.1.2　苯系物的降解

改性 TiO_2 是降解苯系物的常用材料之一，其性能较纯 TiO_2 显著提升。

甘毅等[20]研发的氧化石墨烯(graphene oxide, GO)非金属掺杂 TiO_2 光触媒在波长 254 nm 紫外光(功率 48 W)、苯初始质量浓度 103 mg·m^{-3}、气体停留时间 50 s 的条件下，对气态苯的降解率达 84.96%，显著优于纯 TiO_2 及空塔实验结果。GO 与 TiO_2 复合后，其大比表面积和丰富的含氧官能团可增强对苯分子的吸附能力，使苯富集于 TiO_2 表面。同时，GO 作为电子受体，可快速转移 TiO_2 受光激发产生的光生电子，有效抑制电子-空穴对复合。此外，GO 与 TiO_2 通过化学键结合形成协同效应，不仅增大了复合光触媒的比表面积，还增加了活性位点，从而显著提升对气态苯的光催化降解效率。尽管该材料对气态苯的降解性能优异，但其必需的 50 s 气体停留时间限制了其在工业级室内处理场景中的应用；相比之下，在日常室内低浓度、低流速苯污染环境中，其性能可满足实际应用需求。

唐峻川[21]采用离子液体(如 [Bmim]Cl)辅助制备的金属 Al 掺杂氧缺陷 TiO_2 光触媒，在氙灯模拟可见光(配备 420 nm 截止滤光片)、甲苯初始体积分数 3×10^{-5}、气体流量 300 mL·min^{-1} 的条件下，对气态甲苯的降解率达 51.04%，远高于空白 TiO_2 的 1.26%。在该方法中，离子液体中的 N、Cl 等元素掺杂进入 TiO_2 晶格，在禁带中形成杂质能级，从而缩小带隙并拓宽可见光吸收范围。同时，离子液体的引入抑制了 TiO_2 晶粒生长，使粒径减小、表面羟基含量提高，从而促进 ROS 生成。此外，Al 掺杂或 $NaBH_4$ 还原引入的氧空位可捕获光生电子，进一步抑制电子-空穴复合，多种协同效应共同提升了对气态甲苯的光催化活性。尽管甲苯降解效率仍有提升空间，尤其与高效光催化体系相比存在一定差距，但其测试条件(气体流量 300 mL·min^{-1})已十分接近日常室内环境(如普通住宅、办公室、学校教室及小型商业空间等)，因此该材料在实际应用转化方面具有较高可行性。

Xue 等[22]研发的 Ag/Ag_2O@TiO_2(A/AO@TO)异质结光触媒在 50 W UV 灯(波长 254 nm)照射、甲苯初始体积分数 3.31×10^{-4} 的体系中，对气态甲苯的降解率达 99.3%，显著高于纯 TiO_2 的 40%(图 4)。

在该异质结结构中, Ag_2O 与 TiO_2 形成 P-N 异质结, 促进光生电子-空穴对的有效分离。同时, Ag 的局域表面等离子体共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)效应增强了对紫外-可见光的吸收, 并加速电子转移至 Ag 表面与 O_2 反应生成·O_2^-, 而 TiO_2 价带空穴与 H_2O 作用生成·OH, 多种活性物种协同提升对甲苯的氧化降解效率。此外, Ag 可抑制 Ag_2O 的光腐蚀, 提高材料稳定性。该材料在处理工业级苯系物污染的室内环境中展现出优异的降解能力。然而, Ag 为贵金属, 且其有效作用波长为 254 nm(属于紫外光谱范围), 导致成本显著增加, 限制了其在日常室内环境中的广泛应用。

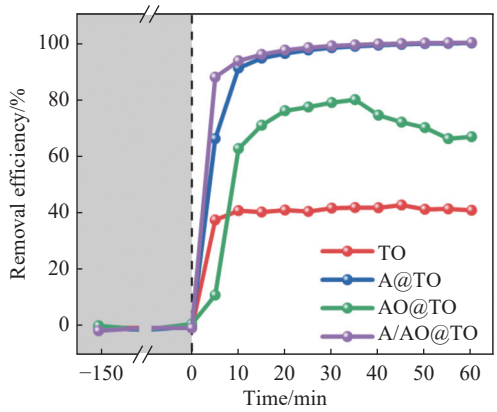


图 4 不同样品(TO、A@TO、AO@TO、A/AO@TO)在紫外光(波长为 254 nm)下的甲苯去除效率[22]

Fig. 4 Toluene removal efficiency of different samples (TO, A@TO, AO@TO, A/AO@TO) under UV light (wavelength: 254 nm) [22]

Lee 等[23]研发的 Cu_2O-Au-TiO_2 异质结光催化剂在 8 W 日光灯照射、初始甲苯体积分数为 1.0×10^{-7} 的气相体系中, 对甲苯的降解率达 92.9%, 显著优于纯 TiO_2(16.6%)。在该异质结中, Cu_2O(窄带隙 1.9~2.2 eV)有效拓宽了可见光吸收范围, 而 Au 的表面等离子体共振(surface plasmon resonance, SPR)效应进一步增强了光捕获能力。Au 作为电子媒介促进 Z 型电荷转移: Cu_2O 导带中的电子首先转移至 Au, 随后传递至 TiO_2 的价带, 与空穴复合, 从而有效抑制载流子复合。同时, 该机制保留了 TiO_2 价带中具有强氧化性的空穴和 Cu_2O 导带中具有强还原性的电子, 能够高效生成·OH 等活性氧物种, 协同提升甲苯等污染物的降解效率。该材料在低能耗处理低浓度挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)方面展现出显著的应用潜力。然而, 由于 Au 为贵金属, 材料成本相对较高。因此, 未来研究应聚焦于 Au 的低负载量优化策略或开发更具成本效益的替代材料, 以推动其在室内空气净化及低浓度工业尾气处理等领域的实际应用。

2.1.3 氮氧化物(NO_x)的脱除

室内 NO_x(如 NO、NO_2)主要来源于燃气燃烧, 改性 TiO_2 可通过调控 ROS 的生成实现 NO_x 的高效脱除。

Sun 等[24]研发的 Fe 掺杂 TiO_2 光催化剂在可见光(波长> 400 nm)照射下, 对初始体积分数为 1×10^{-6} 的室内 NO 表现出优异的去除性能: Fe 摩尔分数为 2% 的 Fe-TiO_2 去除率达 36%, 较未掺杂 TiO_2 提升 8 倍, 为商用 P25 的 2 倍; 且经 5 次循环使用后催化活性无明显衰减, 显著优于未掺杂 TiO_2 和商用 P25。在该催化剂中, Fe^{3+}取代 TiO_2 晶格中的 Ti^{4+}, 通过电荷补偿效应引入氧空位, 使氧空位形成能降至纯 TiO_2 的 23.6%。同时, Fe^{3+}与氧空位共同引入杂质能级, 将可见光吸收范围扩展至 400~600 nm, 并延长载流子寿命至 4.10 ns, 从而促进·O_2^-和·OH 的生成, 加速 NO 氧化为硝酸盐, 显著提升脱硝效率。通过单一 Fe 掺杂, 成功将材料光响应范围拓展至 400~600 nm 可见光区, 且性能优势突出, 这对于光催化材料的发展具有重要意义, 未来有望实现大规模推广应用。

Ma 等[25]研发的 Pd 掺杂二氧化钛纳米管(Pd/TNT)光催化剂在 AM 1.5 模拟太阳光照射下, 对低体积分数 NO_x 的去除率达 53.3%(由 14 kGy 剂量制备), 较未修饰的 TiO_2 纳米管提升 60%, 且对硝酸盐的选择性达 47.3%(图 5), 优势显著。在该催化剂中, Pd 纳米颗粒均匀分散于 TiO_2 纳米管表面,

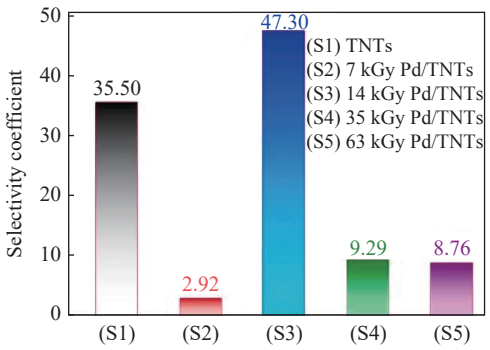


图 5 材料对硝酸盐的选择性系数[25]

Fig. 5 Selectivity coefficient of material for nitrate[25]

一方面有效收集光生电子以抑制载流子复合，另一方面增大光吸收面积，促进 O_2 活化生成 ROS，从而加速 NO 氧化为硝酸盐而非有毒中间产物 NO_2，显著提升 NO_x 降解效率与产物选择性。尽管该材料使用了贵金属 Pd，但其空气净化效果更安全，且适用于多种 NO_x 组分的协同净化。在室内空气净化领域，建议在预算允许的前提下优先采用此类材料。

贾冠冠等[26]研发的 O_3/Fe-TiO_2/UV 异质结中，Fe 掺杂与氧缺陷的协同作用可将 NO_x 净化效率提升至 90%（需严格控制 O_3 质量浓度为 49.08 $mg·m^{-3}$），相较于单一体系表现出更显著的优势。在该体系中，UV 照射下 O_3 与 Fe^{3+}发生氧化还原循环（$Fe^{3+}\rightarrow Fe^{2+}\rightarrow Fe^{3+}$），促进·OH 生成；但需精确调控 O_3 质量浓度：过高质量浓度的 O_3 会与·OH 发生反应（$·OH + O_3 \rightarrow HO_2· + O_2$），消耗活性物种，从而降低 NO_x 的高效净化效果。相较于其他材料，该体系在室内燃气灶具尾气处理方面表现优异，NO_x 净化率高达 90%。但由于涉及 O_3，该体系更适用于通风能力强的专业场所，而非普通家居环境。

2.1.4　其他有毒有害气体的降解

除上述气体外，改性 TiO_2 还可有效吸附其他有毒有害气体。

SO_2 广泛存在于多种工业室内环境中，改性 TiO_2 对 SO_2 具有高效吸附能力。Wanag 等[27]研发的非金属 N 掺杂 TiO_2（TiO_2/N）材料在常温、SO_2 体积分数为 5×10^{-4} 的室内体系中可实现对气态 SO_2 的高效吸附。TiO_2/N-100 ℃样品的总吸附容量最高，达 20.96 $mg·g^{-1}$（以 TiO_2 为基准，下同），而纯 TiO_2（1.19 $mg·g^{-1}$）、TiO_2/N-300 ℃（16.77 $mg·g^{-1}$）、TiO_2/N-500 ℃（3.95 $mg·g^{-1}$）及 TiO_2/N-700 ℃（1.90 $mg·g^{-1}$）的吸附容量均较低。产生该现象的机理在于：TiO_2/N 材料中 N 掺杂引入的铵基团（NH_4^+）等含氮官能团，使材料表面呈碱性，而 SO_2 为酸性气体，二者通过酸碱相互作用显著增强吸附能力；同时，100 ℃低温改性条件下形成的高 BET（Brunauer-Emmett-Teller）比表面积（273 $m^2·g^{-1}$）和大介孔体积（0.23 $cm^3·g^{-1}$）为 SO_2 提供了更多的吸附位点与扩散空间，使吸附容量进一步提升。该材料无需昂贵改性材料及高能耗合成工艺，即可展现出显著的成本效益优势，对工业室内空气净化具有重要促进作用。

改性 TiO_2 对乙醛亦具有高效吸附与降解能力。Wang 等[28]制备的三元复合光触媒 g-C_3N_4/Ag-TiO_2 异质结（C0.5AT）在可见光下对气态乙醛表现出优异的光催化氧化性能。在乙醛体积分数为 2.5×10^{-5} 的体系中，经 160 min 可见光照射，该光触媒对乙醛的降解率达 69.5%，降解性能显著优于纯 TiO_2、g-C_3N_4、g-C_3N_4/TiO_2 及 Ag-TiO_2，为纯 TiO_2 的 5.8 倍。此外，该光触媒的矿化效率达 57.7%，为纯 TiO_2 的 3.7 倍，且稳定性良好，连续照射 600 min 或经 4 次循环使用后仍能保持高效降解性能。g-C_3N_4/Ag-TiO_2 的高性能源于三元体系的协同作用：g-C_3N_4 拓宽可见光吸收范围并增强乙醛吸附能力；Ag 的 LSPR 效应提升光捕获效率并促进电荷转移；三者形成的异质结能够有效抑制载流子复合，保留强氧化性空穴与强还原性电子，高效生成活性物种，协同将乙醛氧化降解为 CO_2 和 H_2O。该材料通过构建异质结构抑制载流子复合，经多路径协同作用增强催化活性。然而，其 160 min 的降解周期较长，对低体积分数乙醛的快速处理能力仍有待优化。

2.2　微生物的杀灭与病毒灭活

2.2.1　杀灭细菌

通过革兰氏染色法可将细菌分为革兰阳性菌和革兰阴性菌。经合理改性的 TiO_2 材料对两类细菌均具有良好的杀灭效果。

2.2.1.1　革兰阳性菌的杀灭

Younis 等[29]合成了香叶醇表面工程改性的锐钛矿型与金红石型 TiO_2 纳米颗粒，该材料对革兰阳性菌（耐甲氧西林金黄色葡萄球菌（methicillin-resistant Staphylococcus aureus, MRSA）、金黄色葡萄球菌）表现出显著抗菌活性，最低抑菌质量浓度为 0.25~1.00 $mg·mL^{-1}$，显著低于单独香叶醇（2.125~4.250 $mg·mL^{-1}$）和纯 TiO_2（1.5~2.0 $mg·mL^{-1}$）。该材料对金黄色葡萄球菌表现为协同作用（分级抑菌浓度指数为 0.284），对 MRSA 表现为叠加作用（分级抑菌浓度指数为 0.735）。此外，该修饰 TiO_2 可将 MRSA 生物膜厚度显著降至 30 000 nm 以下，对生物膜生长的抑制率达 80.0%~84.6%。从结构-效能关联来看：香叶醇与 TiO_2 表面形成的氢键可减少 TiO_2 纳米颗粒团聚，提高其在水溶液中的分

散性, 并增强材料对革兰阳性菌细胞膜的亲和力, 促进催化组分与细菌直接接触; TiO_2 光生电子-空穴对可生成 ROS, 香叶醇可调节 TiO_2 表面电子分布, 促进 ROS 的产生与传递, 加速细菌细胞膜的氧化损伤。通过上述协同作用, 该材料可破坏细菌的细胞壁与 DNA, 抑制 MRSA 生物膜形成, 从而提升对革兰阳性菌的抗菌效率。MRSA 是医院常见的耐药菌, 传播途径广泛, 且易在医疗器械表面形成生物膜。该新型抗菌材料克服了传统抗菌材料在对抗耐药菌及抑制生物膜形成方面的局限, 在医疗场景中具有显著应用潜力。

Sun 等[30] 以松花粉为生物模板, 通过溶胶-凝胶法与浸渍法制备的金属 Ce 掺杂 TiO_2 多孔微球, 在氙灯照射下对革兰氏阳性菌表现出优异抗菌性能: 金黄色葡萄球菌在 180 min 内可被完全灭活, 枯草芽孢杆菌在 30 min 内可被完全灭活; 120 min 内对两种菌的抗菌率均超过 99.9%。该材料的结构优势源于生物模板与元素掺杂的双重调控。松花粉的天然多孔结构被完整保留, 形成的 TiO_2 微球比表面积达 128.9 $m^2 \cdot g^{-1}$, 既提高了光收集效率, 又增加了与细菌的接触位点; Ce 掺杂使 TiO_2 的禁带宽度从 2.80 eV 降至 2.17 eV, 显著拓宽了光响应范围, 同时 Ce^{4+}与 Ce^{3+}的氧化还原循环可快速捕获光生电子, 抑制电子-空穴对复合, 提升光催化活性。在氙灯照射下, 材料产生的 e^-与 O_2 反应生成·O_2^-, 部分转化为单线态氧($^1O_2$); h^+与 H_2O 作用生成·OH, 这些 ROS 协同攻击金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌的细胞膜与细胞壁, 破坏细胞结构, 导致内容物泄漏及细菌死亡。该材料展现出的宽光谱响应特性有助于其在全天候条件下实现抗菌功能。对金黄色葡萄球菌的优异抗菌性能使其在健身房及运动场馆更衣室等室内健身场所具有显著应用潜力(健身房器械表面及更衣室衣物易成为该细菌的滋生场所)。

2.2.1.2　革兰阴性菌的杀灭

时代等[31] 通过溶胶-凝胶法制备了金属 Li 掺杂 TiO_2 纳米抗菌材料, 在优化条件(硝酸锂为锂源、掺杂量为 0.01 mol、表面活性剂为十二烷基苯磺酸钠、焙烧温度为 600 ℃)下, 对大肠杆菌(ATCC 25922)的抗菌率超过 99.5%, 抑菌环直径达 2.6 cm。该材料通过抑制晶粒长大与拓展光响应范围, 增强了光催化性能, 如图 6 所示。Li^+掺杂进入 TiO_2 晶格后, 可抑制晶粒生长以增大比表面积, 同时使光吸收边向可见光区移动, 拓宽光响应范围。Li^+作为杂质能级可捕获光生载流子, 降低电子-空穴对复合率, 提升光催化活性。光催化过程中产生的 ROS 可破坏细菌结构, 从而实现抗菌效果。此外, 硝酸锂作为锂源受 pH 影响较小, 有利于稳定发挥抗菌性能; 600 ℃ 焙烧下材料形成的锐钛矿型 TiO_2 与 Li_2TiO_3、$LiTiO_2$ 相协同, 进一步增强了抗菌活性。该材料可在室内自然光及人造光源照射下高效产生·OH 等 ROS, 从而适应多种室内光照环境。然而, 为实现最佳抗菌效能, 必须对相关参数进行严格控制, 这提高了制备过程的复杂性。

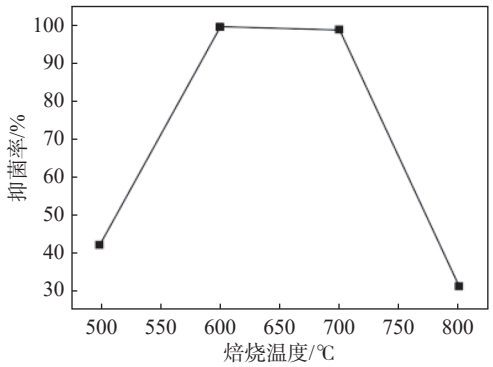


图 6　Li-TiO_2 抗菌材料在不同焙烧温度下对大肠杆菌抗菌性能的影响[31]

Fig. 6 Effect of different calcination temperatures on antibacterial performance of Li-TiO_2 antibacterial material[31]

Rychtowski 等[32] 研发了两类掺杂改性 TiO_2 材料: 一类是经 NH_4OH 处理并在 500 ℃ 下热处理的 TiO_2(记为 RT-500), 另一类是以 $CuSO_4$ 为前驱体制备的 Cu 掺杂 TiO_2(包括 T-$CuSO_4$ 和 RT-$CuSO_4$)。在人工太阳能灯照射下, 这些材料对革兰氏阴性菌大肠杆菌(*E. coli*)表现出高效杀菌性能: RT-500 可在 30 min 内实现大肠杆菌的完全灭活; T-$CuSO_4$ 和 RT-$CuSO_4$ 对大肠杆菌的抗菌效果优于未掺杂的 TiO_2 及其他铜盐掺杂的 TiO_2 样品。NH_4OH 处理使 TiO_2 表面形成氧空位和 Ti^{3+}中心, 拓宽了光响应范围, 增强了对可见光的吸收; Cu 掺杂通过 Cu^{2+}与 Cu^+的氧化还原循环, 进一步抑制光生电子-空穴对的复合, 从而提升光催化活性。在光照下, 材料表面产生的 e^-与 O_2 反应生成·O_2^-, h^+与 H_2O 作用生成·OH。这些活性物种攻击大肠杆菌的细胞膜和细胞壁, 破坏其结构, 导致内容物泄漏, 最终使细菌

死亡。此外，材料表面的硫酸盐物种（SO_4^{2-}）可增强细菌吸附，进一步提升抗菌效率。与仅依赖光催化反应的材料相比，该材料能更高效地利用光照资源，在单位时间内实现更高效率的细菌灭活，且应用场景更为广泛。

2.2.2　病毒灭活

对于部分包膜病毒与非包膜病毒，改性 TiO_2 材料亦表现出良好的灭活效果。

2.2.2.1　包膜病毒的杀灭

Matsuyama 等[33]研发的非金属 N 掺杂 TiO_2（N-TiO_2）光触媒在病毒灭活及光催化性能方面表现优异。其中，负载 Cu 和 Ag 的 N-TiO_2（Ag+Cu/N-TiO_2）在可见光照射下性能最优，可高效灭活 SARS-CoV-2 原始株、Delta 变异株和 Omicron 变异株，经 60 min 光照后，灭活率分别超过 99.0%、88.8% 和 98.6%。在光催化降解方面，该光触媒对乙醛具有较高的降解效率，CO_2 生成速率（体积分数）达 0.939×10^{-6} h^{-1}，远高于未负载金属的 N-TiO_2（0.362×10^{-6} h^{-1}）；且经多次循环使用后，仍能保持稳定的灭活与降解能力，如图 7 所示。该材料的优异性能源于 N-TiO_2 独特的光催化机制与金属负载的协同作用：N-TiO_2 经退火形成锐钛矿相，在可见光照射下产生电子-空穴对，生成大量·OH；负载的 Cu 和 Ag 可捕获光生电子，抑制电子-空穴对复合，并通过类芬顿反应促进·OH 生成；·OH 可攻击病毒，金属离子可增强对病毒的吸附能力，而 N 掺杂则可拓宽光吸收范围，

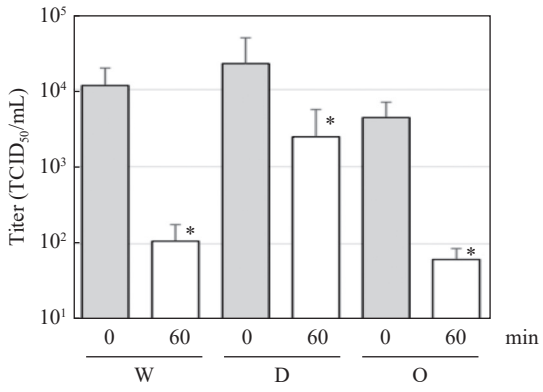


图 7　负载 Ag+Cu/N-TiO_2 在可见光照射下对 SARS-CoV-2 各变异株的灭活效果。W、D、O 分别表示 SARS-CoV-2 原始株、Delta 变异株和 Omicron 变异株[33]

Fig. 7 Inactivation effects of Ag+Cu/N-TiO_2 against various SARS-CoV-2 variants under visible light irradiation. W, D, and O represent the original SARS-CoV-2 strain, the Delta variant, and the Omicron variant, respectively[33]

最终实现高效且稳定的病毒灭活与污染物降解。尽管该材料性能并非最优，但完全满足实际应用需求，其消毒能力覆盖主流变异毒株；使用时无需特殊防护光源，适用于常规室内照明环境，可有效降低安全风险与设备成本，在民用领域的适用性较前一代材料更优。

Kohantorabi 等[34]研发的锐钛矿相金属 Pd 表面改性 TiO_2(101) 光触媒在 SARS-CoV-2 灭活方面效果显著。经原子力显微镜等技术表征，该光触媒可有效吸附 SARS-CoV-2，且吸附的病毒经 70 ℃热处理、紫外线（265 nm、30 min、距光源 10 cm）照射或乙醇处理后均可被有效灭活，其中紫外线处理效果最佳，30 min 内可完全灭活病毒。Pd 修饰的 TiO_2(101) 因病毒吸附能力增强，灭活性能更优。该光触媒稳定性良好，多次使用仍能高效灭活，且灭活后无传染性病毒残留，其核心原理在于 TiO_2(101) 表面与 SARS-CoV-2 的特异性相互作用及光催化机制：一方面，病毒表面刺突蛋白的氨基酸残基与 TiO_2(101) 表面原子通过配位键和氢键实现吸附；另一方面，紫外线照射激发 TiO_2(101) 产生光生电子-空穴对，进而生成·OH，破坏病毒结构导致失活。450 ℃退火处理可增强光催化活性，Pd 纳米颗粒则进一步提升病毒吸附与灭活效率；热处理和乙醇处理分别通过蛋白质变性和脂质包膜破坏实现病毒灭活。相较于负载 Ag、Cu 的复合体系，该材料具有单一锐钛矿相结构，稳定性高且使用安全性良好。然而，该材料的抗菌谱存在局限性，仅适用于新型冠状病毒疫苗生产车间等特定场景。

2.2.2.2　非包膜病毒的杀灭

Fu 等[35]制备的 nAg/nTiO_2 复合涂层在波长 365 nm LED 光照条件下对 MS2 噬菌体（流感病毒、SARS-CoV-1、SARS-CoV-2 的模式替代病毒）具备优异的灭活效果。如图 8 所示，光照 30 min、60 min、90 min 后，病毒滴度分别下降 4.68、5.04、5.36 个数量级，抗病毒性能显著优于 nTiO_2、PTiO_2、CNT/nTiO_2 等其他 TiO_2 基涂层。该涂层薄膜具备较高的表面覆盖率、较低的表面粗糙度以及良好的亲水性，可见光透光率达 70%~80%，适配触控等高接触透明表面使用需求；但在无光照的暗态环境下几乎不具备病毒灭活能力。该涂层的灭活机制为多因素协同作用：Ag 纳米颗粒可作为电子陷阱，抑制光生载流子复合，提升光催化反应活性氧物种的生

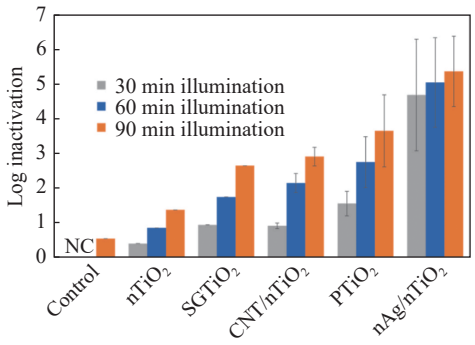


图 8　MS2 噬菌体在接触 30 min、60 min 和 90 min 光触媒（$nTiO_2$、$SGTiO_2$、$CNT/nTiO_2$、$PTiO_2$、$nAg/nTiO_2$）后的失活实验（“NC”代表“未收集”）[35]

Fig. 8　Inactivation of MS2 phages after 30, 60, and 90 minutes of exposure to catalysts ($nTiO_2$, $SGTiO_2$, $CNT/nTiO_2$, $PTiO_2$, $nAg/nTiO_2$), with "NC" indicating "no collection"[35]

成量；同时，纳米银及其溶出银离子本身具备抗病毒活性。相比之下，同为 TiO_2 基材料的 $SGTiO_2$ 虽光催化活性最高，但受限于微孔尺寸效应，病毒颗粒无法进入孔道接触活性位点，因而未展现出相应的抗病毒性能。该材料在医疗触控表面的应用转化中具有发展潜力，但涂层长期服役的耐久性以及针对多微生物共存体系的防护效果仍有待进一步验证。总体而言，$nAg/nTiO_2$ 是一类极具研究价值的光催化改性 TiO_2 复合涂层材料。

2.3　异味物质的去除与净化

本节所述异味主要包括生活代谢类异味、潮湿与霉菌异味，以及垃圾腐臭味、烟味等其他类型，典型气味表现为腐臭味、汗味、鱼腥味、酸腐味、霉味和烟味等混合性不适气味。此类异味来源广泛、组分复杂，通常包含 NH_3、H_2S 等恶臭物质，具有刺激性强、易扩散等特点，但各组分的体积分数普遍较小。

张木[36]制备了非金属 N 掺杂纳米 TiO_2（N-TiO_2）及 Ag/N 共掺杂 TiO_2（Ag/AgCl/N-TiO_2），其中 N-TiO_2 为锐钛矿与金红石混晶结构，呈棒状形貌，对 NH_3 和 H_2S 的脱除效果优异。如图 9 所示，在优化条件（N-TiO_2 负载量 4 g、25 ℃、2 盏紫外灯、NH_3 初始质量浓度 70 $mg·m^{-3}$）下，3 h 内 NH_3 脱除率达 95%，主要产物为 N_2（选择性 73.7%），NO_x 选择性仅为 6.3%；当 Ag 质量分数为 4% 时，Ag/AgCl/N-TiO_2 可使 NO_x 选择性趋近于零。对于 H_2S，在 N-TiO_2 负载量 16 g、2 盏紫外灯、初始质量浓度 30 $mg·m^{-3}$ 的条件下，3 h 脱除率超过 95%，中间产物 SO_2 最终转化为硫酸根。该材料的核心机制在于 N 掺杂对 TiO_2 表面性质与电子结构的双重调控：N 原子取代晶格氧使材料表面呈弱碱性，从而增强对酸性气体 NH_3 和 H_2S 的吸附能力；同时，N 掺杂还可引入晶格缺陷并增大比表面积，有效提升光吸收效率与电子-空穴分离效率，促进 ROS 生成，实现恶臭气体的高效氧化分解。Ag/N 共掺杂则借助 Ag 的 LSPR 效应进一步增强光吸收性能，Ag 纳米颗粒可捕获 NO_2 并促进其还原为 N_2，显著减少有害副产物生成。此外，黏结剂的引入优化了 TiO_2 的负载结构，提高了催化稳定性。该材料兼具高效脱除能力与低有害副产物生成特性，展现出“高效去除＋低有害副产物”的协同优势，在垃圾处理站、公共卫生间及畜禽养殖设施等场景中具有广阔的应用前景。

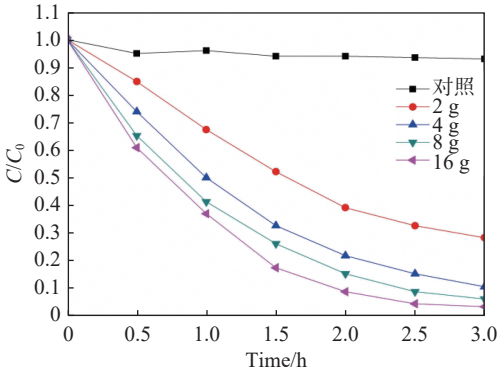


图 9　不同 TiO_2 负载量下 H_2S 的脱除速率[36]

Fig. 9　H_2S removal rates under different TiO_2 loading conditions[36]

胡瑚等[37]研发了一种非金属掺杂改性 TiO_2 祛味产品及其制造方法，其中产品包括粉状、膏状和喷剂三种形态。核心改性材料包含光诱发剂（如安息香异丙醚 $C_{12}H_{16}O_2$ 等）、光吸收剂（如二苯乙醇酮 $C_{14}H_{12}O_2$ 等），其中喷剂还添加了氧化钇（Y_2O_3）。通过浸渍法使改性材料附着于 TiO_2 微粒表面及孔隙中，光诱发剂与光吸收剂协同传递紫外光，Y_2O_3 掺杂可增强催化效果。粉状产品适用于污水除臭，膏状产品稀释后适用于室外污物及大空间环境，喷剂则适用于人居房间。多种场景下的试验表明，该产品祛味效果优异。该专利基于 TiO_2 光催化原理，即在光照下 TiO_2 产生电子-空穴对以降解异味分子。光诱发剂与光吸收剂可拓宽紫外光利用范围并提

升催化效率；Y_2O_3 可抑制电子-空穴复合以增强光触媒活性；抑菌香料则协同实现杀菌抑菌与气味改善，共同强化祛味功能。目前该材料已实现了应用转化，成为掺杂改性 TiO_2 材料应用领域的先驱，同时也揭示出当前该类材料在成果转化方面仍存在不足，实现多种高性能掺杂改性 TiO_2 材料的广泛应用仍是未来面临的重要挑战之一。

Ochiai 等[38] 开发了一种负载于无纺布上的紫外及可见光响应型光触媒，可有效吸附并分解烟草烟雾异味与焦油。所用光触媒包括 TiO_2、Fe^{3+}接枝表面掺杂的 TiO_2（Fe/TiO_2）以及 Cu(Ⅱ)接枝的 WO_3（Cu/WO_3）三种类型，通过将光触媒粉末加热至热塑性树脂熔点以上并吹附于无纺布表面实现负载。其中，Fe/TiO_2 负载量为 18.6 g·m^{-2}，在可见光下对总挥发性有机物（total volatile organic compounds, TVOC）的去除率达 55%，能有效分解焦油；经 24 h 照射后，织物颜色接近初始状态，效果优于其他两种光触媒。该技术基于光催化氧化原理，可应用于室内装饰材料，为解决三手烟污染提供了实用方案。TiO_2 在紫外光照射下激发产生电子-空穴对，进而生成强氧化性物种以氧化分解烟雾成分；Fe/TiO_2 通过铁离子接枝利用界面电荷转移（interfacial charge transfer, IFCT）效应吸收可见光，激发电子将 Fe^{3+}还原为 Fe^{2+}，生成的 Fe^{2+}进一步还原氧气，而价带空穴则氧化有机污染物；Cu/WO_3 虽同样可响应可见光，但分解产物可能干扰光吸收机制，导致织物颜色变暗。无纺布载体有效增大了光触媒的接触面积，从而提升了吸附与分解效率。目前，针对烟草相关污染的处理手段与产品仍较为稀缺，该材料尚处于开发初期，具有广阔的发展前景。

程沐[39] 发明了一种含改性纳米 TiO_2（具体改性方法未说明）的空气除臭净化液，按重量份计，包含经预处理的纳米 TiO_2 25~35 份（粒径 10~20 nm）、玉米多肽 23~28 份、纳米过氧化钙（CaO_2）8~12 份、分散剂 8~12 份及水 13~36 份。制备时，将预处理后的纳米 TiO_2 与其他组分按配方比例混合，在 800~1200 r·min^{-1} 下搅拌 10~15 min 即可。该净化液可显著降低 NH_3、H_2S 及臭气浓度，处理后 NH_3 质量浓度低至 0.01 mg·m^{-3}，H_2S 质量浓度低至 0.002 mg·m^{-3}，臭气浓度低至 118（无量纲）。改性纳米 TiO_2 的预处理过程（加入羧甲基纤维素和硅烷偶联剂 KH-570）是性能提升的关键：羧甲基纤维素通过空间位阻效应防止 TiO_2 纳米颗粒团聚，硅烷偶联剂 KH-570 则在 TiO_2 表面引入有机官能团，增强其与玉米多肽及纳米 CaO_2 的界面相容性，形成稳定的复合体系。改性后的纳米 TiO_2 凭借 10~20 nm 的尺寸效应提供了丰富的活性位点，与玉米多肽中的氨基和羧基形成氢键作用，实现对异味分子的包裹与富集；随后，纳米 CaO_2 分解产生的 ROS 协同 TiO_2 的光催化活性，穿透异味分子内部并破坏其结构，最终将臭味分子中和降解为 CO_2 和无害有机物。预处理过程同时提升了纳米 TiO_2 的稳定性与分散性，确保其在循环使用中持续发挥作用，保障净化液的长效除臭性能。该净化液具有可回收性，且回收后除臭效果依然显著，有效减少了固体废物生成与资源消耗，从而降低长期运营成本，综合性能优异，适用于多种应用场景。

2.4 材料复合应用性能开发

改性 TiO_2 材料与其他材料或方法复合使用，亦可实现有毒有害气体降解、杀菌消毒及异味去除等多重功能。Wang 等[40] 研发了一种基于三维分级结构金红石型 TiO_2 纳米线的多功能聚酯织物（3D THNWP），以聚酯（polyethylene terephthalate, PET）织物为基底，采用两步低温水热法制备：首先在 PET 表面生长 MgAl 层状双氢氧化物作为牺牲模板，随后以 $TiCl_3$ 为前驱体，在饱和 NaCl 溶液中生长 TiO_2 纳米线，形成三级分级结构。如图 10 所示，该织物在紫外光下表现出对罗丹明 B 优异的光催化降解效率，循环使用 5 次后仍保持高活性；同时，其表现出很高的对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌率；经氟硅烷改性后具备超双疏性，可排斥表面张力低至 23.4 mN·m^{-1} 的液体。该材料适用于空气净化滤网等净气场景，具有工艺简便、性能稳定等优势。该材料的净气功能源于 TiO_2 光催化作用与三维结构的协同机制：TiO_2 纳米线在光照下产生电子-空穴对，与 H_2O 和 O_2 反应生成 ROS，氧化降解有机污染物并破坏细菌细胞膜；三维分级结构显著增大比表面积，提供更多活性位点，同时增强对空气的捕获能力，提升光吸收效率与污染物接触效率；氟硅烷改性则降低表面能，赋予材料超双疏性，减少污染物附着，从而提高净化稳定性。三者

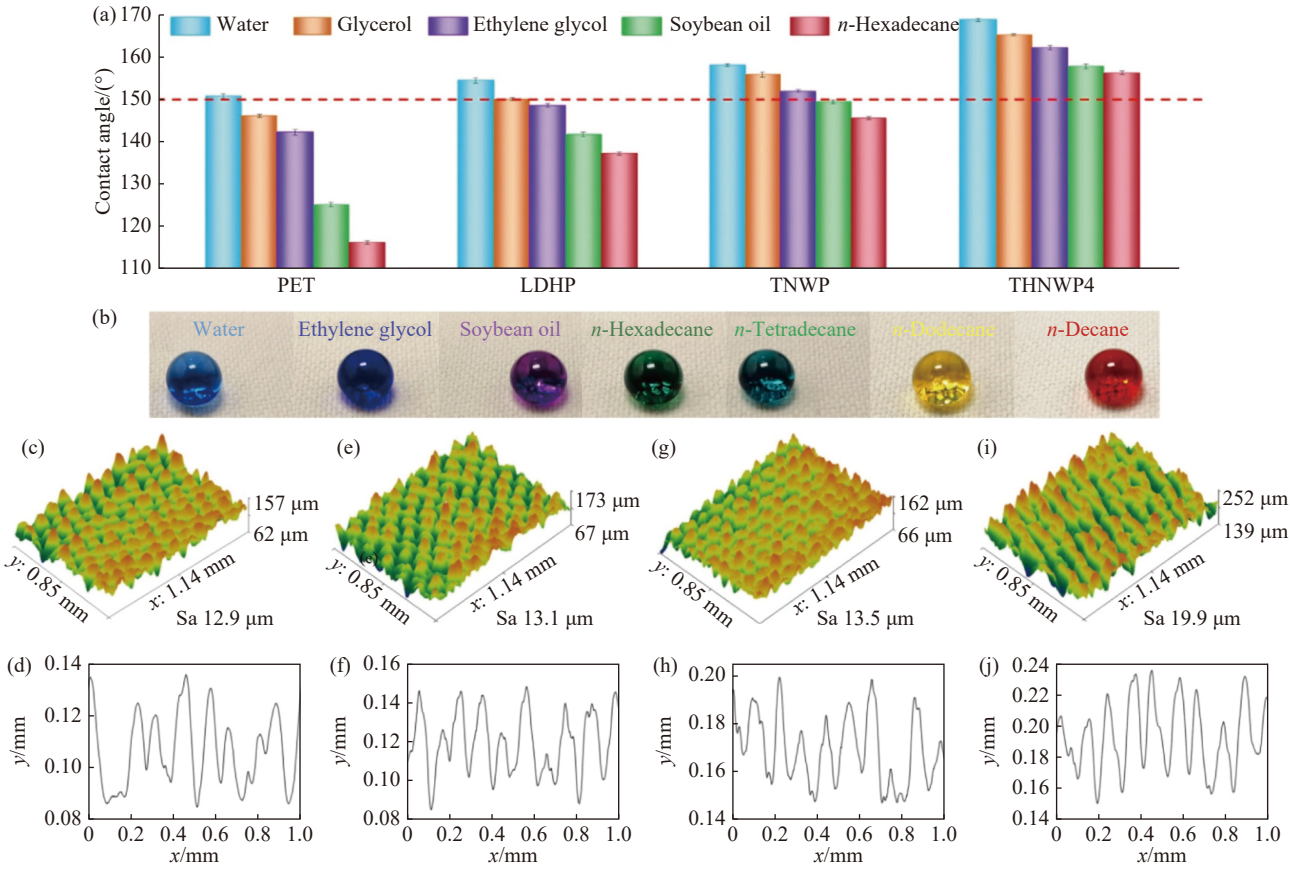


图 10　不同氟化处理织物样品的润湿性能及表面三维形貌[40]。(a)不同织物样品上液滴的接触角; (b)THNWP4 表面沉积的彩色液滴照片; 经氟化处理的(c)~(d)PET、(e)~(f)LDHP、(g)~(h)TNWP 和(i)~(j)THNWP4 样品的 3D 形貌及表面粗糙度曲线

Fig. 10 Wettability performance and surface topography of different fluorinated fabric samples[40]. (a) Contact angles of different liquid droplets on various fabric samples; (b) photographs of colored liquid droplets deposited on THNWP4; 3D topography and surface roughness curves of the fluorinated (c) - (d) PET, (e) - (f) LDHP, (g) - (h) TNWP, and (i) - (j) THNWP4 samples, respectively

协同作用, 实现了高效光催化降解、抗菌及抗污功能。该研究选用通常被认为光电转换效率较低的金红石型 TiO_2 结构, 但实验结果却表明该复合材料的光催化降解性能卓越, 为 TiO_2 结构优化提供了新的研究方向。

Buzaev 等[41] 以玻璃纤维为载体, 采用溶胶-凝胶法, 将钛酸四丁酯、四乙氧基硅烷和硝酸银按比例溶于丁醇-水-硝酸混合液, 将其涂覆于玻璃纤维表面(浸渍), 经阶梯式热处理(300 ℃、400 ℃、500 ℃、600 ℃ 各 30 min)后形成 TiO_2-SiO_2-Ag 薄膜, 制得 TiO_2-SiO_2-Ag 异质结/玻璃纤维复合材料。该材料可将空气中微生物菌落形成单位(colony forming unit, CFU)降至 125 CFU·m^{-3}, 过滤效果较纯玻璃纤维提升约 3 倍。该材料的光吸收范围拓展至可见光区, 薄膜厚度为(23.92 ± 1.24) nm, 比表面积达 12.9 $m^2 \cdot g^{-1}$, 适用于空气净化器滤网等净气场景, 能高效去除空气中的微生物及有机污染物, 且工艺稳定、易于规模化生产。该材料的净气机制源于三组分配方的结构协同与电子调控: TiO_2 经 SiO_2 改性后, 禁带宽度由约 3.2 eV 降至 2.8 eV, 光响应范围扩展至可见光区; SiO_2 增强薄膜与载体的附着力, 并通过形成多孔结构增大比表面积; Ag 纳米颗粒与 TiO_2 形成 Schottky 势垒, 促进光生电子转移, 抑制电子-空穴对复合, 其 LSPR 效应进一步增强光吸收效率, 协同提升 ROS 生成量。三者协同作用使材料既能通过光催化氧化分解有机污染物, 又能破坏细菌细胞膜结构实现抗菌, 从而显著改善空气净化效果。与前述文献相比, 该复合材料的优势在于具备可见光响应能力且工艺易于规模化, 在大众市场具有较高应用潜力。

Wang 等[42] 开发了一种 Cu 的氧化物与氧空位协同改性的 TiO_2 基异质结复合材料(CuO_x/TiO_{2-x}),

该材料通过一步水热法结合浸渍法制备：首先将P25 TiO_2加入物质的量浓度为12 mol·L^{-1}的盐酸溶液中，于180 ℃水热反应5 h，形成富含氧空位的TiO_{2-x}；随后通过沉积-沉淀法在其表面负载纳米铜氧化物（CuO_x），并与P25、TiO_{2-x}及CuO_x/P25进行光催化性能对比，如图11所示。在相对湿度（relatively humidity, RH）为40%、CuO_x与TiO_{2-x}质量比为6%时，材料性能最优。该材料在可见光照射下对室内空气中的甲醛表现出优异的光催化降解性能：初始体积分数为1.80×10^{-4}的甲醛在RH为60%的条件下，150 min内降解率达100%，且循环使用5次后仍保持90%的降解率。该复合材料的禁带宽度降至2.97 eV，可见光响应能力显著增强，其性能优势源于氧空位与CuO_x的协同调控：180 ℃水热反应中，盐酸的刻蚀作用在TiO_2晶格中引入大量氧空位，这些氧空位既是甲醛分子的吸附位点，也是电荷分离中心，可有效吸附大量ROS；CuO_x（主要为Cu和Cu_2O）与TiO_{2-x}形成异质结结构，其中Cu_2O的导带电子可转移至TiO_{2-x}的导带，而Cu纳米颗粒则捕获TiO_{2-x}的光生电子，双重机制进一步抑制电子-空穴对复合，提升ROS产量，并协同促进甲醛氧化为CO_2和H_2O。该复合材料的显著特点在于合成工艺简便：相较于TiO_2-SiO_2-Ag复合材料所需的阶梯式高温热处理，该材料制备过程能耗更低、流程更简、操作参数更易控制，且不依赖稀有原料；此外，该材料易于加工成粉末或涂覆于多种载体上，可满足不同空气净化设备的形态需求。

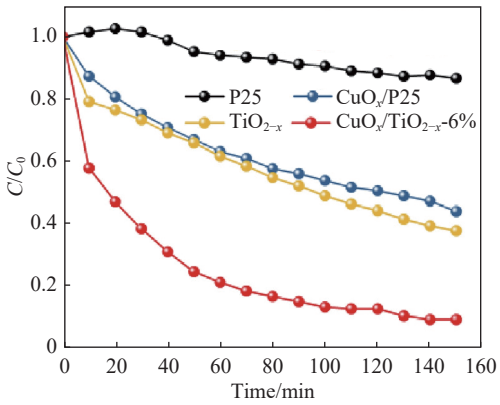


图11　不同光触媒在RH为40%条件下的光催化性能[42]

Fig. 11 Photocatalytic performance of different photocatalysts with RH = 40%[42]

3　改性机制分析

综合上述实例，改性TiO_2的核心目标是突破纯TiO_2宽禁带与高载流子复合率的固有缺陷，通过调控能带结构、优化电荷传输路径及增强表面反应活性，提升光催化性能。这些性能提升的根源在于改性策略对关键作用机制的精准调控，主要体现在能带调控、载流子分离与表面反应三个维度。本节聚焦代表性实例，系统对比分析掺杂改性、异质结构建及氧空位引入三类主流改性机制的作用原理与性能影响规律。

3.1　能带结构调控机制

能带结构决定TiO_2的光响应范围，不同改性策略通过差异化途径重构能带布局、拓展光吸收边界。

掺杂改性：非金属（C、N、S等）掺杂以原子取代TiO_2晶格中的O原子，在禁带中形成杂质能级，使带隙宽度从约3.2 eV缩减至2.1~2.8 eV，将光响应范围从紫外光区拓展至可见光区，如C掺杂TiO_2通过轨道杂化形成中间能级[17]；金属（Fe^{3+}、Ce^{4+}、Pt等）掺杂则通过金属离子d轨道与TiO_2导带及价带的耦合，引入杂质能级并调控能带位置，从而增强对特定波长光的吸收能力。

例如：Cu_2O-Au-TiO_2异质结通过Z型电荷转移机制拓宽可见光吸收范围[23]；g-C_3N_4/TiO_2复合体系则协同拓展可见光响应区间[28]。

氧空位引入：氧空位在TiO_2禁带中形成缺陷能级，可作为电子捕获中心并降低带隙宽度。例如：经盐酸水热处理制备的TiO_{2-x}，其氧空位可降低带隙宽度，从而提升可见光吸收效率[42]；Fe掺杂引入的氧空位可优化能带结构，进一步拓宽光响应范围[24]。

三类机制的能带调控效果对比表明：非金属掺杂在拓展可见光响应方面最具经济性，金属掺杂易于精准调控能带位置，异质结构建可在拓展光响应的同时提升催化活性，而氧空位引入则能在不改变主相结构的前提下优化能带布局。

3.2　载流子分离强化机制

光生电子-空穴对的分离效率通过构建电荷传输通道、引入捕获位点等方式直接决定光催化

活性。

掺杂改性: 非金属掺杂通过晶格缺陷形成电荷分离中心, 降低电子与空穴的复合概率; 金属离子作为电子陷阱, 可捕获 TiO_2 导带中的光生电子, 延长载流子寿命。例如, 在 Fe^{3+}掺杂 TiO_2 中, Fe^{3+}与 Ti^{4+}的离子半径相近, 取代 Ti^{4+}后形成局部电场, 促进电子-空穴分离, 显著延长了载流子寿命[24]。

异质结构建: 异质结界面的内置电场是载流子分离的核心驱动力。例如, $Ag/Ag_2O@TiO_2$ 异质结中, Ag_2O 与 TiO_2 界面的电荷转移促使电子从 TiO_2 导带迁移至 Ag_2O, 而空穴则反向迁移, 显著抑制复合[22]。此外, Au、Ag 等贵金属可作为电子传输介质, 在异质结构中构建电荷传输桥梁, 其 LSPR 效应可加速电子转移, 使载流子复合率降低 60% 以上[23]。

氧空位引入: 氧空位作为电荷捕获位点, 可吸附并稳定光生电子, 降低其与空穴的碰撞概率。同时, 氧空位与金属离子(如 Fe^{3+})协同, 形成双重电荷捕获体系, 进一步提升分离效率[24]。

载流子分离效果的量化对比表明: 异质结构建的分离效率最优, 但依赖精准的能级匹配; 金属掺杂的分离效果稳定, 但成本较高; 氧空位引入的制备工艺简单, 适合规模化应用。

3.3 表面反应活性强化机制

TiO_2 光催化反应发生于材料表面, 改性策略通过优化表面结构、引入活性位点, 增强了对污染物的吸附与氧化能力。

掺杂改性: 非金属(C、N)掺杂可改变 TiO_2 表面电子云分布, 增强对极性污染物的吸附能力, 并提升表面羟基含量, 加速·OH 生成[17, 26]; 金属(Pt、Pd、Ag 等)掺杂则可增强 O_2 的吸附与活化能力, 促进 $\cdot O_2^-$等 ROS 的生成。例如, Pt/TiO_2 中, 粒径为 1.3 nm的 Pt 纳米颗粒与氧空位相互作用, 使·OH 生成速率提升了 3 倍[17]。

异质结构建: 异质结界面的协同作用可优化表面反应路径。例如: 在 $g\text{-}C_3N_4/Ag\text{-}TiO_2$ 体系中, $g\text{-}C_3N_4$ 增强污染物吸附, Ag 提升局部反应温度, TiO_2 提供氧化活性位点, 三者协同使乙醛降解矿化效率由 12.2% 提升至 57.7%[27]; $Cu_2O\text{-}TiO_2$ 异质结则显著强化了对难降解有机物的氧化分解能力[23]。

氧空位引入: 氧空位作为表面活性中心, 可吸附并活化 H_2O 和 O_2 分子, 加速 ROS 生成。例如, TiO_{2-x} 中的氧空位可使表面羟基含量增加 40%, 同时降低污染物吸附能, 促进反应进行[42]。

表面反应活性对比显示: 贵金属掺杂的表面活化效果最优但成本较高; 异质结构建的协同作用适配多种污染物降解; 氧空位引入的表面改性兼具低成本与高活性, 是平衡性能与实际应用的优选方案。

4 实际环境下的性能挑战和对策

4.1 实际环境下的性能挑战

经掺杂、异质结构建等手段改性的 TiO_2, 在实验室理想条件下可展现出优异的光催化活性、稳定性和选择性, 但在真实室内环境中, 其应用性能存在显著差距, 主要面临以下三类挑战。

首先是光源性质的挑战。自然光与人工光源在光谱分布、强度及稳定性方面差异显著, 导致改性 TiO_2 的光催化性能出现分化, 这一问题在室内昼夜光源切换场景中尤为突出。Tong 等[43] 利用 Blender 的 Infinigen Indoors 工具生成了 500 个室内场景, 通过采样视角并放置镀铬球作为光照探针, 渲染不同条件下的高动态范围(high dynamic range, HDR)环境图与深度图, 发现室内光照具有显著的时空动态性。自然光照受昼夜与天气影响, 紫外-可见光占比及强度波动可达 10~30 倍; 人工光源强度虽稳定, 但光谱集中于 400~700 nm 可见光区, 缺乏紫外组分, 且昼夜交替时光源频繁切换。室内光照的大幅波动导致改性 TiO_2 光生载流子生成效率不稳定, 频繁的光源切换使其难以适配光谱与强度变化, 载流子分离效率下降, 最终造成光催化性能波动及净化效果不稳定。

其次是环境介质的挑战。室内大气中的粉尘及酸性气体(如 SO_2、NO_x)易吸附于改性 TiO_2 表面, 堵塞活性位点, 阻碍其与目标污染物接触, 且该问题随使用时间延长而愈发显著。Tryba 等[44] 以泡沫 Ni 负载掺杂 TiO_2 为研究对象, 开展室内 NO_x 光催化降解实验。结果表明: NO_x 在 TiO_2 表面逐步生成硝酸盐、亚硝酸盐等吸附态中间产物, 优先占据表面羟基与氧空位等活性位点; 随着光照时间延长, 吸附态氮物种持续累积, 导致活性位点被覆盖, 目标污染物接触受阻, NO_x 总去除效率逐步下降。

羟基位点被占据后，·OH 生成量减少，载流子分离与利用效率降低，催化性能持续衰减。此外，高温处理引发的 TiO_2 颗粒烧结、孔道收缩及比表面积下降，将进一步加剧活性位点屏蔽效应，由此导致的失活规律与粉尘物理堵塞及酸性气体化学毒化一致。此类气态污染物吸附沉积导致的位点堵塞与性能衰减问题在室外通风条件下不显著，但在 NO_x 体积分数相对稳定的室内环境中尤为突出。

最后是污染物复杂性与降解特异性的挑战。实际室内污染物组分复杂、种类多样，多以低体积分数复合态共存，与实验室单一高体积分数模拟体系存在本质差异，导致改性 TiO_2 的净化性能分化，难以维持实验室中的稳定效能。马晓佳等[45]研究了低体积分数复合挥发性有机物（volatile organic compounds, VOCs）体系与实验室单一体系的性能差异，聚焦污染物竞争吸附、中间产物干扰及光生载流子分配失衡三大机制。研究发现：在复合体系中，大分子优先占据活性位点，使目标气体降解率降幅达 35%；降解中间产物附着于光触媒表面，堵塞活性位点并削弱光吸收；光生载流子优先向特定污染物转移，造成选择性降解。这表明实验室单一体系的数据无法直接外推至室内场景，需通过协同改性以适配复合污染，同时也凸显当前改性 TiO_2 研究偏重降解特异性而忽视普适性的问题，为未来研究指明了方向。

尽管如此，实际环境下的性能挑战尚未成为主流研究重点。现有成果多以高浓度单一污染物降解效率、量子产率等为核心评价指标，鲜少考虑室内复杂环境因素的耦合影响，忽视光源、环境介质及污染物等实际问题的作用，导致实验室优化的高性能催化体系在真实场景中因缺乏系统性抗干扰设计而迅速失活。这种“重理想性能、轻实际适配”的研究导向，使改性 TiO_2 的实验室成果与产业化应用之间形成技术鸿沟，限制了其在室内空气净化领域的规模化推广。

4.2 技术对策

针对上述挑战，除优化基础改性方案外，目前还发展出以下几类技术对策。

针对光源挑战，除增强环境光照强度这一基础方法外，还可采用复合发光材料技术，使材料自身具备光源功能。Zhang 等[46]通过溶胶-凝胶法制备了碳点（carbon dots, CDs）/TiO_2 包覆长余辉荧光粉（$SrAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$，简称 SAO）的核壳结构复合光触媒（CDs/$TiO_2$@SAO），并将其应用于木质涂料。该复合材料以 SAO 为核负责储能发光，CDs/TiO_2 承担光催化与光谱响应拓宽功能。研究发现，CDs/TiO_2@SAO 在 400~700 nm 可见光区具有宽吸收带，SAO 可在白天储能、夜间释放绿光（余辉≥6 h，亮度≥3.19 mcd·m^{-2}），为 TiO_2 提供持续光驱动。在可见光下 160 min 内甲醛降解率约 60%，黑暗中可稳定降解 360 min，经 6 次循环使用后性能衰减不足 5%，稳定性优异。该材料的核心机制为“储能-发光-催化”协同：白天 CDs/TiO_2 吸收可见光降解甲醛，SAO 同步储能；夜间 SAO 释放可见光驱动 CDs/TiO_2 持续催化，实现昼夜连续净化甲醛。该研究思路理论上可有效应对光源挑战，但目前多数复合材料的储能与发光性能尚难满足光催化需求，能实现缓慢衰减已是近年研究的重要突破，未来该类复合材料的发展仍任重道远。

此外，近年研究发现可利用低频超声（20~80 kHz）辅助技术，使材料在特殊室内环境下实现“无掺杂增强”。Jeyaprakash 等[47]采用超声辅助法制备氧空位改性 TiO_2 光触媒（TiO_2-US），并将其用于四环素（tetracycline, TC）的声光催化降解。该光触媒以超声诱导产生的氧空位和 Ti^{3+} 为活性核心，兼具拓宽光谱响应与促进载流子分离的功能。研究发现，TiO_2-US 的禁带宽度缩减至 2.83 eV，如图 12 所示，其在可见光区的吸收显著增强，超声空化效应可破坏 TiO_2 表面钝化层并促进晶格振动。在卤

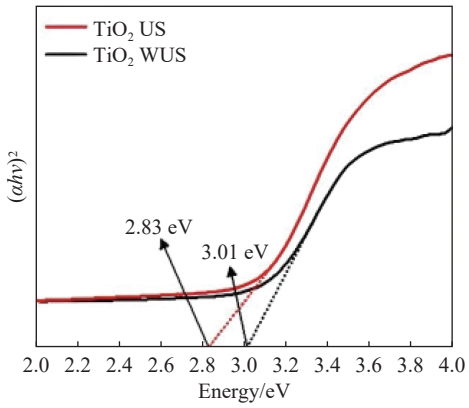


图 12　TiO_2-US 与 TiO_2-WUS 的 Tauc 图[47]

Fig. 12　Tauc plot of TiO_2-US and TiO_2-WUS[47]

素灯照射 60 min 内, TC 降解率达 96%; 太阳光下降解率达 95%; 即使在室内条件下, 亦可实现 83% 的降解率, 经 6 次循环使用后性能衰减不足 4%, 稳定性优异。

该现象的核心机制在于声光协同作用: 在合成阶段, 超声引入氧空位和 Ti^{3+}以优化电子结构; 在降解过程中, 通过空化效应生成 ROS, 与光生载流子协同加速 TC 的矿化分解。理论上, 该声光协同策略可有效缓解光源限制问题, 但目前该体系仅对 TC 的分解效果显著。鉴于 TC 主要存在于医院和制药厂废水中, 属于典型水体污染物, 其实际应用场景仍需进一步探索。

针对环境介质带来的挑战, 目前已发展出分子屏障与自清洁两类技术对策。分子屏障策略通过在 TiO_2 表面构建复合结构防护层, 减少粉尘及酸性气体与催化表面的接触面积, 从而阻断酸性气体与表面羟基的直接反应。Lim 等[48] 以氮掺杂 TiO_2(N-TiO_2)为核心催化组分, 将其负载于蜂窝状(honeycomb, HC)过滤器上, 形成三维多孔物理屏蔽框架, 不仅延长了甲醛分子的滞留时间、促进其与活性位点接触, 还能有效阻挡大分子杂质及碳质中间体的堆积; 同时, N 掺杂在 TiO_2 晶格中引入氮缺陷(N_o)与氧空位(OVs-Ti^{3+}), 构建电子层面的屏蔽位点, 抑制光生载流子复合, 并减少水分子及杂质气体对活性位点的竞争吸附, 从而协同实现对甲醛分子的选择性吸附与催化。研究发现, 该样品的禁带宽度缩小至 3.10 eV, 电荷载流子寿命显著延长, 在室内典型甲醛体积分数下, 降解率达 87%~100%, 清洁空气输送速率为 9.45 $L\cdot min^{-1}$; 即使在常见室内湿度条件下, 仍能维持较高的甲醛降解效率, 且经 10 次循环后仍保持较高的 CO_2 产率, 分子屏蔽能力明显增强。从作用机理看, N 缺陷与氧空位协同调控氧化路径, 引导甲醛高效转化为 CO_2, 无有毒副产物生成, 契合室内安全净化需求。然而, 该方法虽转移了失活问题, 却对复合材料的性能提出了更高要求。

自清洁策略则利用改性 TiO_2 生成 ROS 以分解表面污染物。Shin 等[49] 采用 Au 纳米颗粒修饰 TiO_2 构建等离子体光催化材料, 聚焦于湿度波动及 VOCs 环境下材料的抗失活能力与污染物降解机制, 系统研究其自清洁性能。通过 $NaBH_4$ 还原法将 Au 纳米颗粒负载于 TiO_2 表面, 并利用 X 射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)等表征手段验证其强电子相互作用; 同时结合原位电子顺磁共振(electron paramagnetic resonance, EPR)等技术, 探究材料在不同湿度及单一/混合 VOCs 条件下的自清洁过程, 分析 ROS 生成路径与污染物降解中间产物的演变规律。研究发现, Au/TiO_2 在自清洁性能方面取得双重突破: 其一, 具备优异的湿度耐受性, 在 RH 为 25%~80% 范围内对乙醛和甲苯的去除效率均超过 70%, 克服了纯 TiO_2 对湿度的强依赖性; 其二, 通过等离子体效应显著增强抗失活能力, Au 的 SPR 效应促进界面电荷转移, 提升·O_2^-的生成效率, 加速甲苯降解的开环步骤, 抑制惰性中间产物的累积, 使材料在循环实验与连续运行中均保持稳定活性。此外, Au 与 TiO_2 之间的强相互作用形成羟基储备库, 即使在低湿度条件下也能高效氧化降解污染物, 可为室内应用提供有力支撑。自清洁性能的实现依赖于改性 TiO_2 表面活性位点的充分暴露与 ROS 的高效生成, 该特性与光催化性能存在内在协同关系。自清洁能力本质上是高催化活性的体现, 与通过改性提升 TiO_2 光催化效率的研究方向高度一致。尽管该研究通过 Au 改性显著提升了材料的抗失活能力与环境适应性, 但贵金属的高成本限制了其规模化应用。后续研究可聚焦于低成本改性策略, 如采用非贵金属掺杂或构建复合半导体体系, 在维持协同性能的同时降低材料成本, 推动实际应用转化。

针对污染物本身的挑战, 除优化改性材料外, 还可结合高效吸附材料, 当前主流思路为多元协同改性。Liu 等[50] 将活性炭纤维(activated carbon fiber, ACF)、氧空位改性 TiO_2 与 ZIF-8 复合, 并融入水泥基体, 开发出兼具装饰性与甲醛净化功能的墙体材料, 其制备流程如图 13 所示。首先通过原子层沉积(atomic layer deposition, ALD)技术在 ACF 表面包覆纳米 TiO_2 薄膜, 克服 ACF 表面化学惰性, 为 ZIF-8 的原位生长提供活性位点; 随后在 TiO_2-ACF 表面原位生长 ZIF-8 纳米晶, 强化甲醛吸附能力并抑制脱附; 最后将 ZIF-8@TiO_2-ACF 与水泥浆料混合制备复合材料。研究表明, 该材料能够充分发挥“吸附-光催化”协同效应: ACF 与 ZIF-8 首先吸附并富集甲醛, 降低传质阻力; 在紫外光照射下, TiO_2 被激活产生光生载流子, 将甲醛氧化为 CO_2 和 H_2O,

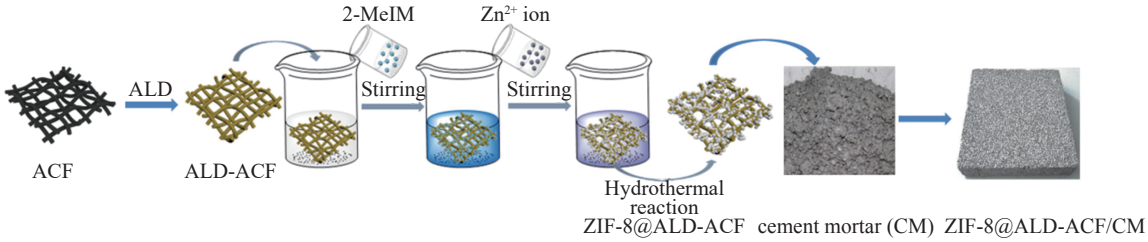


图 13　基于水泥的复合材料制备工艺[50]

Fig. 13　The preparation process of the cement-based composites[50]

实现 ACF 与 ZIF-8 的原位再生，有效避免吸附饱和与二次污染。该设计将净化功能集成于建筑墙体材料中，无需额外设备，可长期应对室内甲醛污染，适用于新装修住宅、办公室等典型场景。

该研究提出的复合材料，核心优势是吸附材料与氧空位改性 TiO_2 的协同作用，通过活性炭纤维快速捕集、ZIF-8 精准富集以及 TiO_2 原位降解再生，有效解决了单一吸附材料易饱和、纯 TiO_2 对低体积分数 VOCs 降解效率不足的问题，实现了净化功能与室内装修场景的深度适配。然而，该体系仍存在待优化之处：水泥基材料的碱性环境可能影响光触媒的长期稳定性，ZIF-8 成本较高不利于量产，且 TiO_2 对室内可见光的利用效率仍有待提升。未来可通过光触媒界面修饰、低成本吸附组分替代及 TiO_2 可见光改性等策略，强化该体系的产业化应用潜力。

在多元改性方面，为揭示多元改性协同作用机理，Cai 等[51] 采用两步法（机械球磨+高温退火）实现了 P25(H)-PtAu 光触媒的规模化合成。首先将 P25 与 Pt、Au 前驱体球磨形成均匀浆料，再于体积分数为 5% 的 H_2/Ar 氛围中进行高温退火，同步实现 TiO_2 氢化与 PtAu 纳米合金负载，并成功验证了 10 g 级批量制备的可行性。随后，采用扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）/ 扫描透射电子显微镜（scanning transmission electron microscope, STEM）等技术表征其微观结构，并在模拟室内环境装置中测试其对低体积分数甲醛的降解效率与稳定性，结合密度泛函理论（density functional theory, DFT）计算分析相关机理。研究发现：氢化处理与 PtAu 纳米合金负载协同作用，使材料禁带宽度降低、吸收边红移，可见光吸收能力显著提升；PtAu 纳米合金促进光生载流子分离，优化表面反应动力学，使该光触媒对低体积分数甲醛的去除率远超原始 P25 及商用光触媒。此外，该光触媒循环稳定性优异，可实现 10 g 级批量制备且性能波动较小。该研究通过多元贵金属改性策略显著提升了 TiO_2 的光催化性能，并通过精准调控负载比例有效解决了成本难题。同时，该研究聚焦低体积分数甲醛体系探究净化性能，更贴合实际室内空气污染特征，为改性材料在室内空气净化设备中的应用提供了性能支撑与科学依据。

总体而言，在应对实际环境中的性能挑战时，主要的技术对策可归纳为“参数优化”与“功能代偿”两类。采用“参数优化”思路，可从改性 TiO_2 的合成方法或组分设计着手，探寻最优方案。该路径是经典且主流的研究范式，同时也是从根本上解决问题的办法，然而探索所需的时间与资源相对较多。采用“功能代偿”思路，可将改性 TiO_2 的性能局限转移至环境或复合材料层面，通过与其他材料（或环境）复合，利用后者在特定性能上的易提升性，弥补 TiO_2 的性能短板，从而实现整体功能优化。该策略适用于当某项性能难以通过材料本征改性提升的情形。尽管相关研究相对较少，且无法从根源上改善材料本征缺陷，但低成本、易转化、适配场景广泛的优势使其具备较大应用潜力。

5　结 论

本文系统综述了改性 TiO_2 在室内空气净化领域的研究进展与应用潜力。掺杂、异质结构建、氧空位引入等策略有效拓展了 TiO_2 的光响应范围，降低了光生载流子复合率，从而提升了其对 VOCs 的降解效率、病菌消杀率及异味物质去除率。在此基础上，通过与合适的基材复合，其综合性能可实现对传统净化技术的超越。

然而，当前研究仍面临诸多挑战。就材料本身而言，高性能改性体系对贵金属的依赖导致成本居

高不下; 而在向低成本方向发展的过程中, 材料常存在稳定性不足、光催化性能欠佳、合成工艺能耗高及温度控制困难等缺陷。此外, 在各类室内环境中, 光源特性、环境介质、污染物复杂性及降解特异性等挑战均制约着规模化量产。

未来研究可从 3 个维度实现突破: 其一, 优化改性策略, 探索非贵金属掺杂、复合半导体构建等路径, 开发兼具高稳定性与优异光催化性能的新材料; 其二, 强化抗干扰设计, 综合运用复合发光、低频超声辅助、自清洁等技术, 提升材料对复杂室内环境的适应能力; 其三, 聚焦复合污染适配性, 通过协同改性手段解决污染物竞争吸附与中间产物干扰等问题, 增强材料对 VOCs、异味及微生物的普适降解效能, 缩小实验室条件与实际应用场景下材料性能的差距。上述 3 个方面的协同突破, 将共同推动材料达到规模化量产所需的性能标准。

总体来看, 改性 TiO_2 凭借其高效性、稳定性及环保特性, 已成为室内空气净化领域的重要研究对象, 且未来在该领域将展现出广阔的应用前景。

参考文献:

[1] U. S. Environmental Protection Agency (EPA). Care for your air: a guide to indoor air quality[EB/OL]. [2025-08-01]. https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/care-your-air-guide-indoor-air-quality.

[2] 张彰, 徐宜宏, 蒋一昕, 等. 进口家具产品甲醛含量微创检测技术的研究 [J]. 中国口岸科学技术, 2025, 7(6): 52-56.
Zhang Zhang, Xu Yihong, Jiang Yixin. Research on minimally invasive detection technology for formaldehyde content in imported furniture products[J]. China Port Science and Technology, 2025, 7(6): 52-56.

[3] 孙德文, 杜秀, 姜春胜, 等. 臭气处理工艺研究进展 [J]. 中国造纸学报, 2024, 39(增刊 1): 200-207.
Sun Dewen, Du Xiu, Jiang Chunsheng, et al. Research progress on odor treatment process[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2024, 39(S1): 200-207.

[4] 阴世超, 任兆成. 萃取车间有机废气治理方案比较分析 [J]. 绿色矿冶, 2023, 39(3): 73-77.
Yin Shichao, Ren Zhaocheng. Comparative analysis of organic waste gas treatment schemes in extraction workshop[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2023, 39(3): 73-77.

[5] Sheoran K, Siwal S S, Kapoor D, et al. Air pollutants removal using biofiltration technique: a challenge at the frontiers of sustainable environment[J]. ACS Engineering Au, 2022, 2(5): 378-396.

[6] Lim Y G, Kim J W, Bak C U, et al. Development of integrated volatile organic compound purification system using tubular NaA zeolite membrane: experimental and theoretical insights into vapor permeation and pervaporation process[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 325: 124692.

[7] 栾吉梅, 刘馨, 姜鹏, 等. 纳米二氧化钛光催化综合实验设计与实践 [J]. 实验技术与管理, 2023, 40(11): 199-204.
Luan Jimei, Liu Xin, Jiang Peng, et al. Design and practice of comprehensive experiment for nano-TiO_2 photocatalysis[J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(11): 199-204.

[8] 夏泽林, 刘世民, 郭玉, 等. TiO_2 制备改性及光催化应用研究进展 [J]. 中国陶瓷工业, 2020, 27(1): 41-45.
Xia Zelin, Liu Shimin, Guo Yu, et al. Preparation, modification and photocatalytic application progress of nano-TiO_2[J]. China Ceramic Industry, 2020, 27(1): 41-45.

[9] Mao Tan, Zha Junyan, Hu Ying, et al. Research progress of TiO_2 modification and photodegradation of organic pollutants[J]. Inorganics, 2024, 12(7): 178.

[10] 孙莹雪. 板钛矿二氧化钛光催化甲烷氧化性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2024: 1-85.
Sun Yingxue. Study on photocatalytic methane oxidation performance of brookite titanium dioxide[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024: 1-85.

[11] 马娜. 光催化技术在水处理中的应用进展 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(9): 181-183.
Ma Na. Application progress of photocatalytic technology in water treatment[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2025, 45(9): 181-183.

[12] 朱雨, 陈先银, 李涛. TiO_2 纳米材料在降解废水中的应用现状 [J]. 聊城大学学报 (自然科学版), 2025, 38(5): 756-763.
Zhu Yu, Chen Xianyin, Li Tao. Current application of TiO_2 nanomaterials in wastewater degradation[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(5): 756-763.

[13] 杨金玉. 复合改性型二氧化钛基催化剂的光催化活性及机理研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2024.
Yang Jinyu. Research on photocatalytic activity and mechanism of modified titanium dioxide-based catalysts[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2024.

[14] Farooq N, Kallem P, ur Rehman Z, et al. Recent trends of titania (TiO_2) based materials: a review on synthetic approaches and potential applications[J]. Journal of King Saud University - Science, 2024, 36(6): 103210.

[15] Qin Fei, Kang Yuyang, San Xingyuan, et al. Spontaneous

exciton dissociation in Sc-doped rutile TiO_2 for photocatalytic overall water splitting with an apparent quantum yield of 30%[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147(15): 12897-12907.

[16] Zhang Tianqi, Guo Zhenfeng, Huang Ziting, et al. Performance-enhanced oxygen vacancy-rich C-TiO_2 nanofiber membranes for dual photocatalytic/bactericidal water treatment[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 377: 134169.

[17] 简垲琳, 王宁. C 掺杂 TiO_2 光催化剂制备及降解空气中甲醛研究[J]. 化工生产与技术, 2023, 29(2): 28-32.
Jian Kailin, Wang Ning. Preparation of C-doped TiO_2 photocatalyst and study on its degradation of formaldehyde in air[J]. Chemical Production and Technology, 2023, 29(2): 28-32.

[18] 朱佳新, 熊裕华, 郭锐. 二氧化钛光催化剂改性研究进展[J]. 无机盐工业, 2020, 52(3): 23-27, 54.
Zhu Jiaxin, Xiong Yuhua, Guo Rui. Research progress in modification of TiO_2 photocatalyst[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(3): 23-27, 54.

[19] 张伟, 来文庆, 田蕾, 等. 纳米 TiO_2 光触媒降解空气中甲醛的实验研究[J]. 解放军预防医学杂志, 2020, 38(6): 46-47.
Zhang Wei, Lai Wenqing, Tian Lei, et al. Experimental study on degradation of formaldehyde in air by nano-TiO_2 photocatalyst[J]. Journal of Preventive Medicine of Chinese PLA, 2020, 38(6): 46-47.

[20] 甘毅. 氧化石墨烯基 TiO_2 光催化剂的制备及其对气态苯光催化性能的研究[D]. 合肥: 合肥学院, 2020.
Gan Yi. Study on preparation of graphene oxide-based TiO_2 photocatalyst and its photocatalytic performance for gaseous benzene[D]. Hefei: Hefei University, 2020.

[21] 唐峻川. 离子液体作用下改性 TiO_2 和 g-C_3N_4 光催化降解气相甲苯[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
Tang Junchuan. Photocatalytic degradation of gaseous toluene by modified TiO_2 and g-C_3N_4 assisted with ionic liquid[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[22] Xue Xiuling, Gong Xiuwen, Chen Xiaoyi, et al. A facile synthesis of Ag/Ag_2O@TiO_2 for toluene degradation under UV-visible light: effect of Ag formation by partial reduction of Ag_2O on photocatalyst stability[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2021, 150: 109799.

[23] Lee J Y, Choi J H. Fabrication of a Cu_2O-Au-TiO_2 heterostructure with improved photocatalytic performance for the abatement of hazardous toluene and α-pinene vapors[J]. Catalysts, 2020, 10(12): 1434.

[24] Sun Peng, Han Sumei, Liu Jinhua, et al. Introducing oxygen vacancies in TiO_2 lattice through trivalent iron to enhance the photocatalytic removal of indoor NO[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(10): 2025-2035.

[25] Ma He, Li Yuanyuan, Wang Changhua, et al. TiO_2-based photocatalysts for removal of low-concentration NO_x contamination[J]. Catalysts, 2025, 15(2): 103.

[26] 贾冠冠, 张兴惠, 高鑫, 等. O_3/Fe-TiO_2/UV 净化室内气体污染物的研究[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 439-444, 450.
Jia Guanguan, Zhang Xinghui, Gao Xin, et al. Study on the purification of indoor gas pollutants by O_3/Fe-TiO_2/UV[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(2): 439-444, 450.

[27] Wanag A, Kusiak-Nejman E, Kapica J, et al. Nitrogen-modified titanium dioxide as an adsorbent for gaseous SO_2[J]. Adsorption Science & Technology, 2014, 32(5): 403-412.

[28] Wang Congyu, Rao Zepeng, Mahmood A, et al. Improved photocatalytic oxidation performance of gaseous acetaldehyde by ternary g-C_3N_4/Ag-TiO_2 composites under visible light[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 602: 699-711.

[29] Younis A B, Milosavljevic V, Fialova T, et al. Synthesis and characterization of TiO_2 nanoparticles combined with geraniol and their synergistic antibacterial activity[J]. BMC Microbiology, 2023, 23: 207.

[30] Sun Jiaqi, Yu Senshen, Cui Ziheng, et al. Synthesis, characterization, and photocatalytic antibacterial activities of porous Ce-doped TiO_2 microspheres using pine pollen as novel biotemplates[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(32): 15276-15297.

[31] 时代, 杨合, 薛向欣, 等. Li 掺杂二氧化钛抗菌材料的表征及抗菌性[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2020, 41(1): 55-61.
Shi Dai, Yang He, Xue Xiangxin, et al. Characterization and antibacterial properties of Li-doped nano-TiO_2 antibacterial material[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(1): 55-61.

[32] Rychtowski P, Paszkiewicz O, Román-Martínez M C, et al. Impact of TiO_2 reduction and Cu doping on bacteria inactivation under artificial solar light irradiation[J]. Molecules, 2022, 27(24): 9032.

[33] Matsuyama T, Saeki S, Kosaka S, et al. Inactivation of SARS-CoV-2 variants by nitrogen-doped titanium dioxide loaded with metals as visible-light photocatalysts[J]. Biotechnology Letters, 2023, 45(4): 551-561.

[34] Kohantorabi M, Wagstaffe M, Creutzburg M, et al. Adsorption and inactivation of SARS-CoV-2 on the surface of anatase TiO_2(101)[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(6): 8770-8782.

[35] Fu Han, Yaniv V, Betzalel Y, et al. Creating anti-viral high-touch surfaces using photocatalytic transparent films[J]. Chemosphere, 2023, 323: 138280.

[36] 张木. 二氧化钛光催化降解 NH_3、H_2S 等恶臭气体的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
Zhang Mu. Study on photocatalytic degradation of fetid gases such as NH_3 and H_2S by titanium dioxide[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.

[37] 邯郸市正香环境科技有限公司. 改性二氧化钛祛味产品及制造方法: CN202411480120.6[P]. 2025-02-18.
Handan Zhengxiang Environmental Technology Co. , Ltd. Modified titanium dioxide deodorizing product and method of manufacturing: CN202411480120.6[P]. 2025-02-18.

[38] Ochiai T, Aoki D, Saito H, et al. Analysis of adsorption and decomposition of odour and tar components in tobacco smoke on non-woven fabric-supported photocatalysts[J]. Catalysts, 2020, 10(3): 304.

[39] 海南保斯绿环保科技有限公司. 一种纳米空气除臭净化液及其制备方法: CN202010026511.6[P]. 2020-05-29: 6.
Hainan Baoshi Green Environmental Protection Technology Co. , Ltd. A nano-air deodorizing and purifying solution and a method for its preparation: CN202010026511.6[P]. 2020-05-29: 6.

[40] Wang Tao, Jia Xueying, Lyu Chang, et al. Multifunctional textiles based on three-dimensional hierarchically structured TiO_2 nanowires[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(23): 27557-27566.

[41] Buzaev A A, Lyutova E S, Tkachuk V A, et al. Synthesis of TiO_2-SiO_2-Ag/fiberglass with antibacterial properties and its application for air cleaning[J]. ACS Omega, 2023, 8(26): 23521-23527.

[42] Wang Yang, Gao Peng, Li Benhang, et al. Enhanced photocatalytic performance of visible-light-driven CuO_x/TiO_2-x for degradation of gaseous formaldehyde: roles of oxygen vacancies and nano copper oxides[J]. Chemosphere, 2022, 291: 133007.

[43] Tong Mutian, Wu Rundi, Zheng Changxi. Spatiotemporally consistent indoor lighting estimation with diffusion priors[C]//Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference. New York: Association for Computing Machinery, 2025: 107.

[44] Tryba B, Prowans B, Wrobel R J, et al. Application of TiO_2 supported on nickel foam for limitation of NO_x in the air via photocatalytic processes[J]. Molecules, 2024, 29(8): 1766.

[45] 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.
Ma Xiaojia, Tang Xuejing, Jin Fengxian, et al. Research advancements in the use of TiO_2-based materials for the photocatalytic degradation of volatile organic compounds[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(4): 590-601.

[46] Zhang Longfei, Wang Ying, Peng Limin, et al. Self-luminous wood coatings with carbon dots/TiO_2 grafted afterglow $SrAl_2O_4$: Eu, Dy core-shell phosphors for long-lasting formaldehyde removal[J]. Polymers, 2023, 15(9): 2077.

[47] Jeyaprakash J S, Rajamani M, Mani P, et al. Highly efficient ultrasound-driven Ti^{3+}-doped TiO_2 with oxygen vacancies: a promising visible-light catalyst for complete sonophotocatalytic degradation of tetracycline[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(12): 5135-5147.

[48] Lim D H, Bathla A, Anwer H, et al. The effects of nitrogen-doping on photocatalytic mineralization of TiO_2 nanocatalyst against formaldehyde in ambient air[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2024, 59: 303-323.

[49] Shin G, Shit S C, Koo M S, et al. Plasmonic enhancement enables deactivation-resilient TiO_2 for sustainable VOCs remediation under practical conditions[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(33): e26193.

[50] Liu Ruina, Mei Junshuai, Ren Lipei, et al. Cement-based composites with ZIF-8@TiO_2-coated activated carbon fiber for efficient removal of formaldehyde[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2024, 31: 20220243.

[51] Cai Hairui, Yang B, Hou Jie, et al. Scalable synthesis of PtAu nanoalloy-decorated hydrogenated TiO_2 for high-efficiency indoor formaldehyde photodegradation[J]. Nanomaterials, 2025, 15(9): 683.