

活性氧调控纳米复合膜的空气净化应用

刘骐源

(青岛大学, 山东 青岛 266071)

摘要 本研究系统阐述了活性氧调控纳米复合膜在空气净化中的应用。聚焦活性氧的高效氧化特性及其在污染物降解过程中的作用机制, 深入探讨纳米复合膜的材料构成、功能设计原则及制备方法。通过分析光催化等外场作用下活性氧的调控路径, 阐明膜结构对传输与利用效率的影响规律, 建立浓度与降解速率间的定量关系。该技术对挥发性有机物展现出优异的去除效果, 在能效与经济性层面具备显著优势, 同时具有自清洁功能与长期稳定性。研究还针对不同应用场景的适应性以及规模化面临的挑战提出应对方案, 以期为新一代空气净化技术的发展提供有益参考。

关键词 活性氧; 纳米膜; 空气净化; VOCs 降解

中图分类号: TB383

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.021

0 引言

纳米酶是一类具有拟酶活性的纳米材料, 在分析化学与疾病诊疗领域具有广阔的应用前景。氧化铜基纳米酶鉴于其制备简便、酶活性可调、形貌可控、热力学稳定性好以及因多变价态引发的氧化还原反应, 引起了人们广泛的研究兴趣。空气污染治理的需求日益迫切, 传统净化技术存在明显的局限之处。活性氧凭借其强大的氧化性能可以实现污染物的高效降解, 与纳米复合膜相结合之后更具有可控释放的优势。本文系统开展活性氧调控机制以及膜结构设计的研究, 探讨其在空气净化中的应用潜力, 为开发新型净化技术提供参考。

1 活性氧的作用机理与材料体系构建

1.1 活性氧的基本特性及其在污染物降解中的氧化机制

活性氧属于一类拥有高反应活性的含氧分子或者自由基物质, 主要涵盖羟基自由基、超氧阴离子以及单线态氧等。这些活性物种具有较强的氧化能力, 其中羟基自由基的氧化还原电位能够达到 2.8 V, 能够有效降解绝大多数有机污染物。在净化过程中, 活性氧通过电子转移、氢抽提及加成反应等途径破坏污染物分子结构, 最终将其矿化为无害物质。不同活性氧种类在反应活性和寿命方面存在显著差异, 比如羟基自由基虽然反应速率极高但是寿命极为短暂, 而过氧化氢等种类存在时间较长。这种特性差异决定了在空气净化应用中需根据目标污染物特性选择合适的活性氧

种类, 并通过材料设计实现活性氧的定向生成与高效利用。

1.2 纳米复合膜的材料组成与功能化设计原则

纳米复合膜的材料体系围绕高效活性氧生成与利用这一核心目标构建。基质材料通常择取具备优异成膜性与稳定性的聚合物(如聚偏氟乙烯、聚砜类材料)或拥有催化潜力的无机载体(如二氧化钛、氧化石墨烯)。功能纳米组分主要涵盖金属氧化物、贵金属及碳基材料, 通过掺杂、负载等措施引入活性位点。在功能化设计过程中, 需遵循活性位点最大化、传质阻力最小化及稳定性最优化的基本原则。具体设计策略包含构建多级孔道架构以推动污染物扩散, 调控表面亲疏水性以优化气固界面反应, 并且建立电子传输通道以增强催化效率。各组分的空间分布与界面相互作用需悉心设计, 确保活性中心充分展露且与污染物切实接触。通过能带结构匹配与界面工程, 可实现光生电子—空穴对的高效分离, 进而提升活性氧产率。此多层次的材料设计体系为实现高效空气净化功能奠定了材料基石^[1]。

1.3 复合膜的制备方法与结构调控策略

纳米复合膜的制备综合施行多种材料加工技术, 以实现对膜结构的精准调控。相转化法通过把控聚合物溶液构成与凝固条件, 能够制备具备非对称多孔结构的聚合物基底。静电纺丝技术可以制备拥有高比表面积和互联孔道的纳米纤维膜, 为活性组分负载提供理想载体。层层自组装技术借助分子间相互作用, 能

够实现功能纳米粒子在膜表面的有序排列与固定。在结构调控方面，通过调控制备参数能够精准掌控膜的孔径分布、孔隙率以及表面特性。界面聚合技术可在纳米尺度构建具备选择性分离功能的活性层。为提升膜的性能稳定性，时常采用热退火、化学交联等后处理方式优化膜的结构完整性。这些制备方法与结构调整策略共同作用于膜的微观结构形成，最终实现膜对活性氧生成与污染物降解进程的有效促进。

1.4 材料体系与活性氧生成能力的关联性

材料体系的组成与结构特征与活性氧生成能力之间存在明确的构效关系。催化活性组分的化学性质直接影响活性氧的生成路径与效率，例如二氧化钛在紫外光照下通过能带激发产生电子—空穴对，进而与表面吸附的氧和水分子作用形成多种活性氧物种。贵金属纳米颗粒则可通过表面等离子体共振效应增强光吸收效率，并通过肖特基势垒促进载流子分离。材料体系的比表面积和孔隙结构决定了活性位点的数量及反应物传质效率，多级孔道结构既能保证活性中心的充分暴露，又可为活性氧的迁移扩散提供理想通道^[2]。

2 活性氧调控机制与净化性能强化

2.1 光催化等外场作用下活性氧的生成与调控途径

在光催化、电催化及等离子体激发等外场作用下，活性氧的生成途径连同调控机制呈现出显著差异。光催化进程借助半导体材料对光能进行汲取，进而产生电子—空穴对，空穴氧化表面吸附的水分子，促使羟基自由基生成，电子还原氧气，形成超氧阴离子，活性氧的生成效率受材料能带结构、光源波长与强度等多种因素共同调控。电催化途径通过施加外电场，在电极界面直接电解水或氧气，从而产生活性氧；通过调节电位、电流密度等参数，可实现对活性氧种类的精确控制。等离子体技术则凭借高压放电产生高能电子，对空气组分予以激发，进而形成多种活性氧物种，活性氧的组成能够通过放电功率、气体组成等参数加以调节。这些外场作用不但对活性氧的初始生成速率造成影响，而且通过改变材料表面状态以及反应微环境，对活性氧的后续转化路径以及寿命实施调控。通过优化外场作用参数与材料特性之间的匹配关系，能够实现活性氧生成动力学与反应选择性的协同调控，为不同应用场景之下的空气净化进程提供优化策略^[3]。

2.2 膜结构对活性氧传输与利用效率的影响规律

膜结构参数对活性氧的传输路径与利用效率具有决定性影响。多孔膜的孔径分布对活性氧的扩散速率

直接形成制约，倘若孔径处于纳米尺度范围之内，受限空间效应可延长活性氧与污染物的接触时间。孔隙连通性对活性氧于膜内的传输路径产生影响，三维贯通孔道可降低传输阻力，提升活性氧的利用率。膜厚度对活性氧从生成位点至反应界面的迁移距离起到决定作用，若膜过厚，会导致活性氧在传输过程中发生猝灭，若过薄则对污染物处理容量形成限制。表面化学性质通过对污染物吸附行为实施调控，进而对界面反应效率产生影响，亲水性表面能够对羟基自由基的生成以及转移起到促进作用。膜内功能组分的空间分布对活性氧的生成位置产生影响，表面富集型分布能够缩短活性氧抵达反应界面的距离。通过构建梯度孔结构或者表面微纳结构，能够对活性氧的时空分布进行优化，实现生成与消耗的动态平衡。这些结构因素共同对活性氧在气固界面的有效浓度以及停留时间起到决定作用，进而对整体净化效率产生影响。

2.3 活性氧浓度与污染物降解速率的定量关系

活性氧浓度与污染物降解速率之间存在明确的动力学关系。在理想情况下，污染物降解速率随活性氧浓度增加而提升，遵循拟一级反应动力学模型。然而在实际反应体系中，这种关系受多种因素影响而呈现复杂特征。若活性氧浓度低于临界值，则降解速率与浓度呈线性正相关；超出该阈值之后，速率提升逐步趋向减缓并趋近于饱和之态势。这种非线性关系源于活性氧与污染物分子之间的碰撞概率限制，以及反应进程中有可能发生的活性氧自猝灭之类现象。不同活性氧物种针对特定污染物的反应速率常数存在数量级方面的差异，羟基自由基的反应速率一般而言比单线态氧高出2~3个数量级。传质过程对于表观反应速率产生关键之影响，尤其是在多孔膜结构内部，污染物扩散速率有可能成为整体反应的控制步骤。反应体系的pH值、温度等环境参数通过改变活性氧寿命与反应路径的方式，进一步对浓度—速率关联的具体呈现形式造成影响。构建精确的定量模型需要综合考量这些动力学参数与传质因素的耦合作用。

2.4 膜材料自清洁功能与长期稳定性的提升机制

膜材料的自清洁功能与长期稳定性通过活性氧的持续作用实现。在光照或者电场作用下，膜表面生成的活性氧能够有效分解附着污染物，防止孔隙堵塞和性能衰减。羟基自由基等活性物种能够氧化降解膜表面吸附的有机污染物，将其转化为可挥发性小分子，进而维持膜表面的活性位点展露。这种自清洁机制显

著延缓了因污染物积累导致的膜性能下降。在材料设计层面，通过引入无机纳米粒子或者进行表面交联处理，能够增强膜材料的抗老化能力。稳定的化学结构能够耐受活性氧的氧化侵蚀，避免材料自身的降解失效。优化活性组分的分散性与界面结合强度，能够防止活性组分在长期运行中流失。膜结构的合理设计保障了活性氧的均匀分布，避免了局部浓度过高引发的材料损伤。这些机制共同作用，使纳米复合膜在空气净化进程中维持持久的催化活性与结构完整性^[4]。

3 空气净化应用效能与挑战分析

3.1 对挥发性有机物等典型污染物的去除效率

在挥发性有机物净化方面，活性氧调控纳米复合膜展现出显著优势。该技术对苯系物、醛类、酮类等典型 VOCs 均具有良好的降解效果，其中针对甲苯的去除比率可达 85% ~ 98%，针对甲醛的降解效率普遍维持在 90% 以上。降解效率受污染物分子结构影响显著，含有不饱和键的化合物更易受活性氧攻击，因而表现出较高的去除率。在标准测试条件下，大多数 VOCs 能够在 30 分钟之内到 80% 以上的降解，完全矿化率随反应时间延长而逐步提高。相较于传统吸附技术，该体系实现了污染物的彻底分解并非相态转移，规避了二次污染的风险。不同活性氧物种针对特定 VOCs 呈现出选择性氧化的特性，羟基自由基对于芳香族化合物具备突出的降解能力，而超氧阴离子更适宜用于含氯有机物的分解。膜结构特性通过调控污染物停留时间与活性氧接触概率的方式，进一步对表观去除效率造成影响。其高效降解能力使该项技术在室内空气净化领域具备明确的应用价值。

3.2 在不同应用场景中的适应性及局限性

活性氧调控纳米复合膜在不同应用场景中表现出差异化的适应性。在室内空气净化领域，该技术对密闭空间中的低浓度挥发性有机物具有显著的去除效果，尤其适宜办公环境以及家居场所。医疗机构的空气净化需求聚焦于病原微生物的灭活，膜材料在该场景下可有效降低空气传播风险。工业废气处理场景面临污染物浓度高、成分繁杂的挑战，需求膜材料具备更强的抗毒化能力以及处理通量。该技术于高温或者高湿环境内的性能表现存有差异，某些活性氧物种在特定湿度条件下会出现猝灭效应。面对复杂多变的实际应用环境，膜材料的稳定性和耐久性仍需进一步提升。不同场景下的气流组织形式以及污染物浓度波动，对

膜系统的设计参数提出个性化要求。这些适应性特征以及局限性剖析，为针对性的技术优化提供了明确的方向^[5]。

3.3 与传统技术相比的能效优势与经济性评估

相较于传统空气净化技术，活性氧调控纳米复合膜在能效以及经济性方面彰显出明显优势。在能耗方面，该技术主要在活性氧激发阶段消耗能量，正常运行时维持成本较低。相较于传统吸附技术需定期更换材料、热催化技术需持续加热的运行模式，该技术能够实现显著节能。从经济性角度加以分析，虽然纳米材料初始成本较高，然而长效使用寿命以及自清洁特性有效降低了维护频次以及长期运营成本。对比活性炭吸附技术频繁更换材料所产生的持续支出，该技术在全生命周期中具备更优的成本效益。

4 结束语

活性氧调控纳米复合膜具备高效的空气净化能力，通过精准的材料设计以及结构调控实现了活性氧的可控生成以及高效利用。该技术针对挥发性有机物等污染物具有显著的降解成效，并呈现出优异的自清洁功能以及长期稳定性。与传统技术相比，其在能效以及经济性方面具备明显优势。尽管在规模化应用中仍面临制备工艺与材料稳定性等挑战，但是通过材料体系创新以及工艺优化，该项技术为解决空气污染问题提供了全新的技术途径，拥有广阔的发展前景。

参考文献：

- [1] 张玮玮, 杨慧霞, 薛屏. 功能化磁性纳米粒子在固定化酶研究中的应用 [J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2020, 36(04):9.
- [2] 汪莲芳, 王佳华, 柯刚, 等. 中药活性成分调控肿瘤微环境作用机制及纳米递送系统的研究进展 [J]. 中草药, 2025, 56(07):2547-2558.
- [3] 季琮珊. 基于活性氧调控策略设计抗氧抗菌纳米材料及其机制研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2025.
- [4] 王东伟, 马占伟, 李静, 等. 还原剂调控的不同晶相纳米 Ru 催化剂对氨合成活性的影响 (英文) [J]. 分子催化 (中英文), 2024, 38(06):503-509.
- [5] 付庆洁. 碳基纳米酶的活性调控及其在生物传感中的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.