

有机光催化剂在环境污染治理中的应用

宁志涛

运城市生态环境局稷山分局 山西 运城 043200

摘要: 在环境污染问题日趋严峻的当下, 探寻高效且绿色环保的污染治理技术迫在眉睫。有机光催化剂凭借其特有的光催化性能, 在环境污染治理领域彰显出巨大的应用潜力。本文深入阐释了有机光催化剂的作用原理与多样种类, 着重介绍其在降解有机污染物、处理废水废气以及去除土壤污染物等方面的具体应用实例, 全面剖析当前面临的挑战, 并对未来发展趋势开展展望, 旨在为有机光催化剂在环境污染治理中的广泛应用提供坚实的理论支撑。

关键词: 有机光催化剂; 环境污染治理; 光催化降解; 可持续发展

1 引言

全球工业化进程加速, 环境污染愈发严重, 威胁生态平衡与人类健康。传统污染治理手段成本高、效率低、易造成二次污染。光催化技术作为新兴绿色环保技术, 备受科研与工业界关注。有机光催化剂是光催化体系重要部分, 因结构易设计、光响应范围宽、催化活性高, 在环境污染治理中优势显著, 应用前景广阔。研究其在污染治理中的应用, 对解决环境问题、实现可持续发展意义重大。

2 有机光催化剂概述

2.1 作用原理

有机光催化剂是一类在光的作用下能够引发和促进化学反应的有机化合物, 其作用原理主要涉及以下几个关键步骤: 有机光催化剂分子具有特定的共轭结构, 能够吸收特定波长的光。当光子能量被光催化剂分子吸收后, 其电子从基态跃迁到激发态, 形成激发态的光催化剂分子。激发态的有机光催化剂具有较高的能量, 处于不稳定状态。它会通过分子内或分子间的电荷转移过程, 将激发态电子转移给反应物分子, 或者从反应物分子接受电子, 从而使反应物分子形成具有活性的自由基或离子中间体。产生的自由基或离子中间体具有较高的反应活性, 能够引发一系列化学反应, 如氧化还原反应、加成反应、取代反应等。在反应过程中, 光催化剂分子本身会回到基态, 继续参与下一轮的光吸收和电荷转移过程, 从而实现催化循环, 不断促进反应的进行。以常见的有机光催化剂如吩噻嗪类化合物为例, 它在吸收可见光后, 分子中的电子从基态跃迁到激发态。激发态的吩噻嗪可以将电子转移给一些具有氧化性的反应物, 自身被氧化为阳离子自由基, 而反应物则被还原为自由基中间体。该自由基中间体进一步与其他反应物发生反应, 生成产物, 同时吩噻嗪阳离子自由基得到电子

恢复到基态, 继续参与催化反应。

2.2 种类

有机光催化剂种类丰富多样, 常见的主要有以下几类:

2.2.1 共轭聚合物光催化剂

共轭聚合物拥有大 π 共轭体系, 这使其能够高效地吸收可见光, 并且具备良好的化学稳定性以及出色的电子传输性能。像聚噻吩类、聚苯胺类等共轭聚合物光催化剂, 在光催化降解有机污染物方面表现出极为优异的性能。以聚噻吩衍生物为例, 通过巧妙地改变其侧链结构和取代基, 可以灵活地调节其能带结构以及光吸收性能, 从而显著提高对不同类型污染物的降解效率。例如, 在侧链引入特定的官能团, 能够增强聚合物与某些污染物之间的相互作用, 促进吸附过程, 进而提升光催化降解效果。同时, 共轭聚合物光催化剂的合成方法不断创新, 如采用电化学聚合法、化学氧化聚合法等, 可以精确控制聚合物的分子量和结构, 进一步优化其光催化性能^[1]。

2.2.2 有机小分子光催化剂

有机小分子光催化剂具有结构清晰明确、易于合成与修饰的特点。常见的有吩噻嗪类、三苯胺类等。以吩噻嗪为例, 其独特的平面结构有利于光生载流子的传输与分离, 在可见光照射下能够高效地催化降解卤代有机污染物。研究发现, 对吩噻嗪分子进行结构修饰, 如在特定位置引入吸电子基团或给电子基团, 可以调节分子的电子云分布, 优化其光催化活性。此外, 有机小分子光催化剂还可以通过与其他分子形成超分子体系, 进一步拓展其应用范围。例如, 将吩噻嗪与环糊精形成包合物, 能够提高其在水溶液中的稳定性和分散性, 增强对水中有机污染物的降解能力。

2.2.3 金属-有机框架(MOF)衍生光催化剂

MOF是由金属离子或金属簇与有机配体通过配位键

自组装形成的具有周期性网络结构的多孔材料。MOF衍生光催化剂融合了MOF的高比表面积、多孔结构以及可调控性等优点,同时具备良好的光催化活性,在环境污染治理中展现出巨大的潜力。例如,以锆基金属-有机框架为前驱体,通过高温碳化制备的氮掺杂碳基光催化剂,对水中抗生素具有良好的吸附和光催化降解性能。这是因为高温碳化过程使得MOF的结构发生转变,形成了具有特殊电子结构和多孔特性的碳基材料,氮掺杂进一步优化了材料的电学性能和化学活性,增强了对污染物的吸附能力和光催化降解效率。此外,MOF衍生光催化剂还可以通过调控前驱体的组成和制备工艺,实现对其结构和性能的精确控制,以适应不同污染物的治理需求。

3 有机光催化剂在环境污染治理中的应用

3.1 降解有机污染物

3.1.1 水中有机污染物降解

在水体污染中,有机污染物种类繁多,包括农药、染料、抗生素等,这些污染物严重威胁着水生生态安全以及人类的健康。有机光催化剂在水中有有机污染物降解方面发挥着关键作用。例如,以共轭聚合物光催化剂降解水中的有机磷农药,在可见光照射下,光催化剂产生的光生电子-空穴对能够有效地破坏有机磷农药的分子结构,使其降解为无毒或低毒的小分子物质。研究表明,通过对光催化剂的结构进行优化,如调整聚合物的共轭长度和侧链结构,以及对反应条件进行精细调控,如控制反应温度、溶液pH值和光照时间等,可以将有机磷农药的降解率提升至90%以上。在染料废水处理中,有机小分子光催化剂能够快速降解多种染料,如罗丹明B、亚甲基蓝等。光催化剂吸收可见光后产生的羟基自由基会对染料分子的发色基团发起攻击,使其褪色并进一步矿化。一些研究通过构建复合光催化体系,将有机光催化剂与其他材料复合,如与二氧化钛复合,利用两者的协同作用,显著提高了对染料的降解效率和光催化稳定性。二氧化钛具有较高的光催化活性,但对可见光的响应能力有限,而有机光催化剂能够弥补这一不足,两者复合后,拓宽了光响应范围,促进了光生载流子的分离,从而提升了整体的光催化性能^[2]。

3.1.2 空气中有机污染物降解

空气中的挥发性有机化合物(VOCs)是大气污染的重要来源之一,会引发雾霾、光化学烟雾等一系列严重的环境问题,对人体健康造成极大危害。有机光催化剂可用于空气中VOCs的降解。例如,基于金属-有机框架衍生的光催化剂负载在多孔载体上,用于降解空气中的苯、甲苯等VOCs。在光照条件下,光催化剂产生的活性

物种能够将VOCs氧化为二氧化碳和水。研究发现,增大光催化剂的比表面积和活性位点,能够显著提高对VOCs的吸附和降解性能。通过优化MOF衍生光催化剂的制备工艺,如控制碳化温度和时间,可以调控材料的孔结构和表面性质,增加活性位点的数量。此外,一些有机光催化剂还可用于室内空气净化,降解甲醛、乙醛等有害气体。通过将光催化剂涂覆在室内装饰材料表面,如墙面涂料、壁纸等,在室内光照条件下即可持续净化空气,改善室内空气质量。例如,将含有机光催化剂的纳米颗粒均匀分散在墙面涂料中,在自然光或室内灯光照射下,光催化剂能够持续产生活性物种,降解空气中的有害气体,为人们创造一个健康的居住环境。

3.2 处理废水废气

3.2.1 废水处理

有机光催化剂在废水处理中的应用涵盖了多种类型的废水。除了上述的有机污染物废水,在处理含有重金属离子的废水时,有机光催化剂也能发挥重要作用。例如,利用有机光催化剂的光生电子可将废水中的重金属离子如汞离子、镉离子等还原为金属单质,从而实现重金属的去除和回收。在这一过程中,光生电子与重金属离子发生氧化还原反应,使重金属离子得到电子被还原。通过控制光催化反应条件,如调节光催化剂的用量、反应时间和溶液的酸碱度等,可以提高重金属离子的还原效率和回收率。在处理工业综合废水时,通常将有机光催化剂与其他废水处理技术联合使用,如与生物处理技术结合。先通过生物处理去除废水中大部分可生物降解的有机物,然后利用有机光催化剂进一步降解难生物降解的有机物和残留的微量污染物,提高废水的处理效果,使其达到排放标准。这种联合处理工艺充分发挥了生物处理技术和光催化技术的优势,既降低了处理成本,又提高了废水处理的彻底性^[3]。

3.2.2 废气处理

对于工业废气中的氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)等污染物,有机光催化剂可通过光催化反应将其转化为无害物质。在光催化降解NO_x的过程中,光催化剂产生的活性氧物种能够将NO氧化为NO₂,进而被进一步氧化为硝酸根离子,从而实现NO_x的去除。研究表明,通过优化光催化剂的结构和反应条件,如选择合适的有机配体和金属离子制备MOF衍生光催化剂,并控制反应温度和气体流速等,可以提高NO_x的降解效率。在处理含硫废气时,有机光催化剂可将H₂S氧化为单质硫,不仅减少了废气中的污染物排放,还实现了硫资源的回收利用。例如,以共轭聚合物光催化剂为基础,构建光

催化反应器,在光照条件下, H_2S 被氧化为单质硫沉积在反应器内,实现了废气处理与资源回收的双重目标。此外,将有机光催化剂与吸附技术相结合,先利用吸附剂吸附废气中的污染物,然后通过光催化反应降解吸附在吸附剂表面的污染物,能够提高废气处理效率和吸附剂的再生性能。这种组合技术能够充分发挥吸附剂的富集作用和光催化剂的降解能力,提高整体的废气处理效果。

3.3 去除土壤污染物

土壤中的有机污染物如多环芳烃、农药残留等严重影响土壤质量和生态系统功能。有机光催化剂可用于土壤污染物的去除。例如,将负载有机光催化剂的纳米材料添加到受污染土壤中,在光照条件下,光催化剂产生的活性物种能够降解土壤中的多环芳烃。通过优化光催化剂的添加量和土壤的水分含量、酸碱度等条件,可以提高对土壤中多环芳烃的降解效率。研究发现,适当增加光催化剂的添加量可以提高活性物种的产生量,但过量添加可能会导致团聚现象,降低光催化效果。此外,调节土壤的水分含量和酸碱度能够影响光催化剂的活性以及污染物在土壤中的迁移和转化。对于土壤中的农药残留,有机光催化剂同样能够发挥降解作用。一些研究采用原位光催化修复技术,将光催化剂与土壤混合后,利用自然光照或人工光源进行照射,实现对土壤中农药残留的去除,减少农药对农作物和地下水的污染风险。这种原位修复技术具有操作简便、成本较低、对土壤环境扰动小等优点,为土壤污染治理提供了一种有效的手段。

4 当前面临的挑战

4.1 光催化效率有待提高

尽管有机光催化剂已在环境污染治理中初显成效,但其光催化效率仍难以契合大规模应用需求。一方面,其光吸收范围与效率有限,许多催化剂仅能吸收特定波长光,对太阳光利用率低。如部分共轭聚合物光催化剂,仅在可见光特定波段有吸收,对紫外与近红外光利用不足。另一方面,光生电子-空穴对复合快,降低了量子效率,二者一旦复合便无法参与反应,削弱了催化剂活性。目前,提高光催化效率的关键在于通过结构与改性,拓宽光吸收范围,提升光生载流子分离效率。可引入新型发色团、优化分子结构,增强对不同波长光的吸收;构建异质结构或添加助催化剂,促进载流子分离传输,提高反应效率。

4.2 稳定性问题

部分有机光催化剂在光催化反应过程中存在稳定性

不足的问题。在光照和复杂的反应条件下,有机光催化剂可能会发生结构变化、降解或失活,严重影响其长期使用性能。例如,一些有机小分子光催化剂在多次光催化循环后,由于受到活性物种的持续攻击,分子结构被逐渐破坏,导致催化活性显著下降。稳定性问题极大地限制了有机光催化剂的实际应用,需要进一步深入研究提高其稳定性的有效方法,如通过分子修饰、构建稳定的复合结构等。通过在有机小分子光催化剂的分子结构中引入稳定的官能团或采用交联等方法,可以增强分子的稳定性。构建复合结构,如将有机光催化剂与无机材料复合,可以利用无机材料的稳定性来提高整体的稳定性,同时还能发挥两者的协同效应,提升光催化性能。

4.3 大规模应用成本高

目前有机光催化剂的制备过程往往较为复杂,需要使用昂贵的原料和精细的合成工艺,这导致其制备成本居高不下。例如,一些MOF衍生光催化剂的制备需要使用特定的金属盐和有机配体,且合成过程需要精确控制反应条件,增加了制备成本。此外,在实际环境污染治理应用中,需要配套相应的光照设备、反应装置等,进一步增加了应用成本。高昂的成本使得有机光催化剂在大规模推广应用方面面临巨大困难,如何降低制备成本和应用成本,提高其经济可行性,是实现大规模应用的重要挑战。未来可以通过开发简单高效的合成方法、寻找廉价替代原料以及优化反应装置等途径来降低成本,推动有机光催化剂的大规模应用。

5 结束语

有机光催化剂作为绿色污染治理材料,在降解有机污染物、处理废水废气、去除土壤污染物等方面优势显著。深入研究其原理和种类,优化结构性能,可提升光催化效率与稳定性。当前,该材料面临光催化效率低、稳定性差、应用成本高等挑战。但随着多学科融合发展,这些问题有望解决。未来,有机光催化剂将在环境污染治理中发挥更大作用,助力实现环境可持续发展。

参考文献

- [1]王宇,李华,张明.(2024).新型有机光催化剂的制备及其在染料废水处理中的应用.环境科学与技术,47(12),112-118.
- [2]陈红,赵强,周明.(2023).有机光催化剂在挥发性有机化合物降解中的研究进展.化工进展,42(09),213-218.
- [3]徐芳,郭伟,胡晓.(2023).有机光催化剂协同生物降解处理含油废水的研究.环境工程学报,17(06),132-139.