

水处理技术中光催化反应的进展及其在污水处理中的应用

张涛

北京市石景山区环境保护监测站, 中国·北京 100049

摘要: 随着全球水资源日益紧张和污染问题的不断加剧, 寻求高效、环保的水处理技术已成为当务之急。光催化反应作为一种新兴的水处理技术, 以其独特的优势在污水处理领域展现出广阔的应用前景。本文详细回顾了光催化反应的发展历程, 深入探讨了光催化材料的种类与性能、反应机理以及影响光催化效率的因素。通过具体实例分析, 展示了光催化反应在污水处理中的实际应用效果, 并对其未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 水处理技术; 光催化反应; 污水处理

Progress of Photocatalytic Reactions in Water Treatment Technology and Their Application in Wastewater Treatment

Tao Zhang

Shijingshan District Environmental Protection Monitoring Station, Beijing, Beijing, 100049, China

Abstract: With the increasing scarcity of global water resources and worsening pollution problems, seeking efficient and environmentally friendly water treatment technologies has become an urgent task. As an emerging water treatment technology, photocatalytic reactions have shown broad application prospects in the field of wastewater treatment with their unique advantages. The paper provides a detailed review of the development history of photocatalytic reactions, delving into the types and properties of photocatalytic materials, reaction mechanisms, and factors affecting photocatalytic efficiency. Through specific case analysis, the practical application effect of photocatalytic reaction in wastewater treatment was demonstrated, and its future development trend was discussed.

Keywords: water treatment technology; photocatalytic reaction; sewage disposal

0 前言

水是人类生存和发展的基础资源, 其质量和数量直接关系到人类社会的可持续发展。然而, 随着工业化进程的加速和城市化水平的提高, 水体污染问题日益严重, 已成为制约社会发展的重要因素。传统的污水处理方法如物理法、化学法和生物法虽然在一定程度上能够去除污水中的污染物, 但存在处理效率低、成本高、易产生二次污染等问题。因此, 寻求高效、环保的新型水处理技术已成为当前的研究热点。

光催化技术在制氢、CO₂ 还原、燃料电池、大气治理、室内空气处理、污水处理、检验检测、生物质利用等众多领域具有广泛应用^[1]。而光催化反应则是利用光催化技术以其独特的优势在污水处理领域展现出广阔的应用前景, 具体表现在光催化反应利用光催化剂在光照条件下催化分解污水中的有机物、重金属离子等污染物, 具有高效、环保、无二次污染等优点。近年来, 随着纳米技术的不断发展和光催化材料的深入研究, 光催化反应在水处理领域的应用取得了显著的进展。

1 光催化反应的基本原理

光催化反应是一种在光照条件下, 利用光催化剂催化分解污染物的化学反应。光催化剂通常是由半导体材料制成, 如二氧化钛 (TiO₂)、氧化锌 (ZnO) 等。这些半导体材料具有特殊的能带结构, 当受到一定波长的光照射时, 能够吸收光能并产生电子-空穴对。这些电子-空穴对具有强氧化还原能力, 能够与污水中的有机物、重金属离子等污染物发生反应, 将其分解为无害的物质。

光催化反应的基本原理主要包括以下几个步骤:

①光吸收: 光催化剂吸收一定波长的光能, 使其价带上的电子跃迁到导带上, 形成电子-空穴对。

②电子-空穴对分离: 在光催化剂内部或表面存在的电场作用下, 电子和空穴被分离并迁移到催化剂表面。

③表面反应: 迁移到催化剂表面的电子和空穴与污水中的污染物发生氧化还原反应, 将污染物分解为无害的物质^[2]。

④产物脱附与催化剂再生: 反应生成的产物从催化剂表面脱附, 催化剂恢复活性, 可继续参与下一轮的光催化反应。

2 光催化材料的种类与性能

光催化材料是光催化反应的核心, 其种类和性能直接影响光催化反应的效率和应用范围。目前, 研究较多的光催化材料主要包括二氧化钛 (TiO_2)、氧化锌 (ZnO)、硫化镉 (CdS) 等。这些材料具有不同的晶型、粒径、形貌和表面修饰等特点, 从而表现出不同的光催化性能。

2.1 二氧化钛 (TiO_2)

二氧化钛 (TiO_2) 是目前研究最广泛、应用最成熟的光催化材料之一。 TiO_2 具有稳定的化学性质、良好的耐腐蚀性和较高的光催化活性。其晶型主要包括锐钛矿型、金红石型和板钛矿型等。其中, 锐钛矿型 TiO_2 的光催化活性最高, 但稳定性较差; 金红石型 TiO_2 的稳定性较好, 但光催化活性相对较低。通过调控 TiO_2 的晶型、粒径和形貌等参数, 可以进一步提高其光催化性能。

2.2 氧化锌 (ZnO)

氧化锌 (ZnO) 也是一种重要的光催化材料, 具有较高的光催化活性和良好的化学稳定性。与 TiO_2 相比, ZnO 的禁带宽度较窄, 能够吸收更宽波段的光, 从而扩大了其应用范围。此外, ZnO 还具有较大的比表面积和良好的吸附性能, 有利于提高光催化反应的效率。然而, ZnO 的光生电子-空穴对复合率较高, 限制了其光催化性能的进一步提高。

2.3 硫化镉 (CdS)

硫化镉 (CdS) 是一种窄禁带半导体材料, 具有优异的光催化性能。 CdS 能够吸收可见光并产生电子-空穴对, 从而有效地降解污水中的有机污染物, CdS 还具有较好的稳定性和可重复使用性。然而, CdS 存在一定的毒性, 限制了其在实际应用中的推广。为了降低 CdS 的毒性并提高其光催化性能, 研究者们通常采用掺杂、复合等方法对其进行改性处理。

2.4 其他光催化材料

除了上述三种常见的光催化材料外, 还有许多其他类型的光催化材料正在不断涌现。例如, 铋系光催化材料 (如 Bi_2O_3 、 BiVO_4 等) 具有较高的光催化活性和稳定性; 铜系光催化材料 (如 Cu_2O 、 CuO 等) 具有良好的可见光响应性能; 氮化碳 ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) 作为一种非金属光催化材料, 具有独特的二维结构和优异的光催化性能。这些新型光催化材料的不断涌现为光催化技术的发展提供了更多的可能性。

3 光催化反应的影响因素

光催化反应的效率受到多种因素的影响, 主要包括光源的选择、光催化剂的种类与性能、反应条件的控制以及污水的特性等。

3.1 光源的选择

光源的选择对光催化反应的效率具有重要影响。不同波长的光对应不同的能量, 能够激发不同类型的光催化剂产生电子-空穴对。因此, 在选择光源时, 需要根据所使用的光催化剂的能带结构来确定合适的波长范围。光源的强度和稳定性也会影响光催化反应的效果。一般来说, 高强度、稳定的光源有利于提高光催化反应的效率。

3.2 光催化剂的种类与性能

光催化剂的种类与性能是影响光催化反应效率的关键因素之一。不同类型的光催化剂具有不同的晶型、粒径、形貌和表面修饰等特点, 从而表现出不同的光催化活性和选择性。在选择光催化剂时, 需要综合考虑其光催化活性、稳定性、成本以及环境友好性等因素。此外, 通过调控光催化剂的制备工艺和改性方法, 可以进一步提高其光催化性能。

3.3 反应条件的控制

反应条件的控制对光催化反应的效率也有显著影响。主要包括反应温度、pH 值、光照时间等因素。一般来说, 适当的反应温度有利于提高光催化剂的活性和稳定性; 而 pH 值的调节则可以影响污水中污染物的存在形态和光催化剂的表面电荷性质, 从而影响光催化反应的效果。而且光照时间的延长可以提高光催化反应的完全程度, 但过长的光照时间可能导致光催化剂的失活。

3.4 污水的特性

污水的特性也是影响光催化反应效率的重要因素之一。污水中的污染物种类、浓度、存在形态以及水质的复杂性等因素都会对光催化反应产生影响。例如, 某些难降解的有机物可能需要更长时间的光照或更强的光催化活性才能被有效降解; 而高浓度的重金属离子可能会抑制光催化剂的活性。因此, 在实际应用中, 需要针对不同特性的污水选择合适的光催化材料和反应条件。

4 光催化反应在污水处理中的应用实例

4.1 染料废水的处理

染料废水是一种典型的难降解有机废水, 其成分复杂、色度高、毒性强, 对环境和人类健康造成严重威胁。光催化反应在染料废水处理方面展现出了显著的效果。以某印染厂废水为例, 该废水含有多种偶氮染料, 色度高达数千倍。研究人员采用 TiO_2 光催化剂对其进行光催化处理, 在优化条件下, 废水的脱色率可达 90% 以上, COD 去除率也达到了 70% 左右。此外, 通过对比实验发现, 经过光催化处理后的废水再经生物处理, 其出水水质可达到国家排放标准。

4.2 重金属废水的处理

重金属废水是一种危害极大的污染源, 其含有的重金属离子如铅、镉、铬等难以生物降解, 且会在环境中积累, 对生态系统和人类健康造成长期影响。光催化反应可用于重金属废水的处理, 通过光催化剂的氧化还原作用将重金属离子转化为沉淀物或无害物质。某电镀厂产生的含铬废水经过光催化处理后, 六价铬的去除率达到了 95% 以上, 出水中的铬浓度远低于国家排放标准。此外, 研究人员还发现, 通过添加适量的助催化剂和优化反应条件, 可以进一步提高光催化处理重金属废水的效率和稳定性。

4.3 生活污水的处理

生活污水是日常生活中产生的各种污水的总称, 其成分复杂多变, 包括有机物、无机物、微生物等多种污染物。光催化反应也可用于生活污水的处理。某小区生活污水经过光

催化处理后, COD 去除率达到了 60% 以上, 氨氮去除率也达到了 40% 左右。此外, 光催化处理还可有效降低污水中的色度和浊度, 提高出水水质。与传统生物处理方法相比, 光催化处理具有占地面积小、运行成本低、无二次污染等优点。

4.4 工业废水的综合处理

工业废水具有成分复杂、浓度高、毒性大等特点, 是水处理领域的难题之一。光催化反应在工业废水的综合处理中也展现出了良好的应用前景^[3]。某化工园区产生的综合废水经过预处理后, 再经光催化处理, 其 COD、氨氮、总磷等指标均得到了显著降低。此外, 研究人员还发现, 通过将光催化技术与生物处理技术相结合, 可以实现工业废水的高效处理和资源化利用。

5 光催化反应在污水处理中的优势与挑战

5.1 优势

①高效性: 光催化反应能够在较短时间内高效降解水中的有机物、重金属离子等污染物, 具有较高的处理效率。②环保性: 光催化反应无需添加大量的化学试剂, 不会产生二次污染, 符合绿色环保的理念。③广谱性: 光催化反应对多种污染物均表现出良好的降解效果, 具有广泛的适用范围。④可再生性: 光催化剂在反应过程中不易失活, 可重复使用, 降低了处理成本。

5.2 挑战

①光催化剂的稳定性: 目前常用的光催化剂如 TiO_2 等在长时间使用过程中可能会出现失活现象, 需要进一步研究和开发稳定性更好的光催化剂。②光源的选择与利用: 不同波长的光对光催化剂的激发效果不同, 需要选择合适的光源并提高光源的利用效率。③反应条件的优化: 光催化反应受到多种因素的影响, 需要进一步研究和优化反应条件以提高处理效果。④大规模应用的可行性: 目前光催化反应在水处理领域的应用大多处于实验室或小规模试验阶段, 需要进一步研究其大规模应用的可行性及经济性。

6 光催化反应的发展趋势与展望

6.1 新型光催化材料的研发

随着纳米技术和材料科学的不断发展, 新型光催化材料的研发将成为未来的重要研究方向。研究者们将继续探索具有更高光催化活性、更好稳定性和更强抗毒性的光催化材料^[4]。例如, 通过调控材料的晶型、粒径、形貌和表面修饰等参数, 进一步提高其光催化性能; 同时, 也将关注非金属光催化材料和复合光催化材料的研究与开发。

6.2 光源技术的改进

光源的选择对光催化反应的效率具有重要影响。未来, 研究者们将继续关注光源技术的改进, 包括提高光源的强度和稳定性、扩大光源的波长范围以及开发新型高效光源等。此外, 还将研究如何将光催化技术与太阳能利用相结合, 以实现光催化反应的自给自足和能源节约。

6.3 反应器设计与优化

反应器的设计与优化对于提高光催化反应的效率和降

低能耗具有重要意义。未来, 研究者们将继续探索高效、紧凑的光催化反应器设计, 以提高光能的利用率和减少反应过程中的能量损失。同时, 还将关注反应器的自动化控制和智能化运行等方面的研究。

6.4 与其他水处理技术的结合

为了充分发挥光催化反应的优势并克服其局限性, 未来将更加注重光催化技术与其他水处理技术的结合。例如, 将光催化技术与生物处理技术相结合, 形成优势互补的联合处理系统; 或将光催化技术与膜分离技术相结合, 实现污水的高效净化和资源化利用。

6.5 实际应用中的经济性与可持续性

在实际应用中, 光催化反应的经济性和可持续性也是需要重点考虑的问题。未来, 研究者们将继续探索降低光催化材料制备成本和提高催化剂使用寿命的方法; 同时, 还将关注光催化反应在实际工程应用中的能耗、设备投资和运行成本等方面的问题, 以实现光催化技术的经济、高效和可持续发展。

7 结论

光催化反应作为一种新兴的水处理技术, 在污水处理领域展现出了广阔的应用前景。通过深入研究光催化材料的种类与性能、反应机理以及影响光催化效率的因素, 我们可以更好地理解 and 掌握这一技术的核心原理。具体实例分析表明, 光催化反应在染料废水、重金属废水、生活污水以及工业废水的处理中均取得了显著的效果。然而, 光催化反应在污水处理中的应用仍面临诸多挑战, 如光催化剂的稳定性、光源的选择与利用、反应条件的优化以及大规模应用的可行性等问题。

未来, 随着新型光催化材料的不断研发、光源技术的持续改进、反应器设计的优化以及与其他水处理技术的结合, 光催化反应在水处理领域的应用将更加广泛和深入。同时, 我们也需要关注光催化反应在实际应用中的经济性与可持续性, 以实现其在污水处理中的长期稳定运行和广泛应用。

总之, 光催化反应作为一种高效、环保的水处理技术, 在污水处理领域具有巨大的潜力和价值。通过不断的研究和创新, 我们有望克服现有技术的局限性, 推动光催化反应在水处理领域的进一步发展和应用, 为解决全球水资源污染问题做出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 崔熠婧, 孙伟宸, 沈超群, 等. 光催化反应器的研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(S1): 30-35+41.
- [2] 汪遵盛. 光催化氧化技术在有机废水处理中的研究进展[J]. 安徽化工, 2024, 50(3): 18-22.
- [3] 翟浩志, 赵文承. 化工厂污水处理环保问题与解决策略[J]. 清洗世界, 2024, 40(8): 120-122.
- [4] 汪颀, 杨显德, 张宏喜, 等. 金属-有机框架纳米材料在光催化方面的应用现状[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2022, 39(4): 57-65.