

城市污水治理系统中先进氧化技术的应用与挑战

刘传毅, 王晓英, 黄璐

重庆市三峡水务有限责任公司, 重庆 401123

DOI:10.61369/UAID.2026010027

摘 要 : 城市化步伐持续加快, 城市污水的排放量也随之不断攀升, 传统污水处理技术在应对难降解有机污染物去除问题时, 逐渐显露出自身的局限性。先进氧化技术 (AOPs) 具备产生高活性羟基自由基的能力, 这种特性使其拥有强劲的氧化效能, 正因如此, 该技术在城市污水深度净化与回收再利用环节中得到了广泛运用, 本文对臭氧氧化、光催化氧化、电化学氧化及 Fenton 类反应等主要 AOPs 的作用机理与工程实践应用展开了系统剖析, 研究了这些技术在提升污水处效率、减少能源消耗以及推动可持续发展方面所发挥的功能, 文章还梳理了 AOPs 在实际应用过程中, 在经济投入成本、设备日常维护以及副产物有效控制等方面面临的难题, 并指出了该技术未来的发展趋势与优化改进方向, 为城市污水治理领域的技术更新升级提供了有价值的参考依据。

关 键 词 : 先进氧化技术; 城市污水治理; Fenton 反应; 光催化氧化; 环境可持续性

Application and Challenges of Advanced Oxidation Processes in Urban Sewage Treatment Systems

Liu Chuanyi, Wang Xiaoying, Huang Lu

Chongqing Three Gorges Water Co., Ltd., Chongqing 401123

Abstract : As urbanization continues to accelerate, the discharge of urban sewage has also been on the rise. Traditional sewage treatment technologies are gradually revealing their limitations in addressing the removal of refractory organic pollutants. Advanced oxidation processes (AOPs) possess the ability to generate highly reactive hydroxyl radicals, which endow them with robust oxidation capabilities. Consequently, these technologies have been widely applied in the advanced purification and recycling of urban sewage. This paper systematically analyzes the mechanisms and engineering applications of major AOPs, including ozone oxidation, photocatalytic oxidation, electrochemical oxidation, and Fenton-like reactions. It investigates the roles of these technologies in enhancing sewage treatment efficiency, reducing energy consumption, and promoting sustainable development. The paper also outlines the challenges faced by AOPs in practical applications, such as economic investment costs, routine equipment maintenance, and effective control of by-products. Furthermore, it points out the future development trends and optimization directions of these technologies, providing valuable references for technological upgrades in the field of urban sewage treatment.

Keywords : advanced oxidation processes; urban sewage treatment; fenton reaction; photocatalytic oxidation; environmental sustainability

引言

城市污水成分复杂且污染物种类多样, 这一特点导致传统生化处理方法很难达到出水水质的标准要求。近些年来, 先进氧化技术凭借其高效能、广适用的氧化特点, 成为了污水深度处理领域的重要发展方向, AOPs 借助生成羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 的方式, 实现了对有机污染物的彻底矿化处理, 这一过程为解决难降解污染物处理难题提供了全新的思路, 本文致力于分析不同类型 AOPs 在城市污水治理系统中的实际应用情况、关键反应作用机理以及工程应用中遇到的挑战, 研究这些技术与其他污水处理技术之间的耦合应用潜力, 同时探索其未来的优化发展路径。

一、先进氧化技术的基本原理与分类

（一）羟基自由基的生成机理

先进氧化技术（AOPs）的核心在于依托物理、化学或电化学手段，生成具备极强氧化能力的羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）。羟基自由基的氧化电位达到 2.80 V，仅低于氟，能够几乎无选择性地作用于大多数有机污染物分子，促使这些分子发生断键、脱氢或加氧反应，进而将复杂有机物彻底氧化为二氧化碳与水， $\cdot\text{OH}$ 的生成路径主要包含臭氧分解、水光解、过氧化氢活化、电解反应以及 Fenton 体系中的 Fe^{2+} 催化反应等，在臭氧氧化体系里，臭氧在碱性环境下通过自分解形成 $\cdot\text{OH}$ ；在光催化体系中， TiO_2 等半导体材料受到紫外光照射后会产生电子 - 空穴对，其中空穴与水分子或羟基发生反应生成 $\cdot\text{OH}$ ；而在电化学氧化体系中，阳极电位会推动水分子电解产生 $\cdot\text{OH}$ 。

（二）主要类型与反应体系

先进氧化技术（AOPs）依据自由基的生成方式与能量来源的差异，可划分为臭氧氧化法、光催化氧化法、Fenton 及其衍生体系、电化学氧化法等多个类别。臭氧氧化技术利用臭氧自身的强氧化性，以及其在水中分解生成羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）的能力，能够高效去除色度、异味以及多种微量有机污染物，在城市污水深度净化中有着广泛应用，光催化氧化技术以 TiO_2 、 ZnO 、 WO_3 等半导体作为催化剂，通过光照激发电子跃迁形成电子 - 空穴对，其中空穴可氧化水或羟基离子生成 $\cdot\text{OH}$ ，实现对有机污染物的彻底分解，Fenton 及类 Fenton 反应依靠 Fe^{2+} 催化 H_2O_2 分解生成 $\cdot\text{OH}$ ，反应速率快、氧化能力强，特别适合处理高浓度、难降解有机废水，电化学氧化技术则通过外加电流在阳极表面生成羟基自由基或其他活性物种，实现无需化学药剂的绿色氧化处理。

（三）技术比较与适用性分析

不同 AOPs 技术在能耗、反应速率以及适用水质等方面各有优劣。臭氧氧化反应速度快，适合大规模连续处理，还能有效去除色度、异味及部分难降解有机物，不过臭氧的制备与传输能耗较高，同时需要防范臭氧逸散带来的环境安全风险，光催化技术拥有绿色环保、催化剂可重复利用等优势，适合处理低浓度、透明度较高的污水，但其反应速率受光源强度、波长及催化剂表面积等因素限制，使得工业化应用受到阻碍，Fenton 体系操作简便、反应速率快、去除效果显著，特别适合高浓度有机废水处理，然而容易产生大量铁泥，增加污泥处理负担并对经济性产生影响，电化学氧化技术具备自动化程度高、可实现原位氧化的优点，但其阳极材料价格高昂、能耗较大且电极容易钝化，总体来看，臭氧氧化与光催化更适合用于低浓度和可见光透过性好的废水处理，而 Fenton 及电化学体系更适合处理高浓度、有毒或难降解废水，未来 AOPs 的发展方向将集中在多技术的耦合与运行条件的优化上，通过能量协同、催化剂改性及智能控制等手段，降低能耗、延长设备使用寿命、减少副产物产生，从而实现高效、低碳与资源化的污水处理目标，推动城市污水治理朝着可持续与绿色方向发展。

二、先进氧化技术在城市污水中的应用实践

（一）臭氧氧化与臭氧催化体系

臭氧氧化技术作为一种高效的深度处理工艺，在城市污水处理领域被广泛用于色度去除、化学需氧量（COD）降低，以及抗生素、表面活性剂等微量有机污染物的降解。臭氧分子拥有较高的氧化电位（2.07 V），既能够直接与有机物发生反应，也能在碱性环境或存在催化剂的条件下分解生成羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ），进而实现更彻底的氧化效果，仅单独使用臭氧时，对部分难降解有机物的去除效率存在局限，所以近年来出现了臭氧催化体系，像臭氧 - 活性炭、臭氧 - 金属氧化物（ MnO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等）以及臭氧 - UV 复合体系都属于此类，这些复合技术通过提供反应位点或促进臭氧分解，大幅提升了 $\cdot\text{OH}$ 的产率与污染物降解速率，在工程应用场景中，臭氧氧化常被用于城市污水厂的深度处理单元，目的是去除难降解有机碳（DOC）、提升出水透明度，同时有效降低抗生素抗性基因的浓度，改善生态安全水平，部分大型污水处理厂通过设置臭氧接触塔与催化反应床，实现了出水 COD 降低 30% 以上、色度去除率达到 80% 以上的处理效果。

（二）光催化氧化技术

光催化氧化技术以 TiO_2 、 ZnO 、 WO_3 等半导体材料作为催化剂，借助光照激发电子从价带跃迁至导带，形成空穴（ h^+ ）与电子（ e^- ）对，其中空穴可与水或羟基发生反应生成羟基自由基，实现对有机污染物的彻底氧化。 TiO_2 凭借化学稳定性高、无毒性及强氧化性的特点，被广泛应用于城市污水的深度净化过程，光催化技术在染料、农药残留、内分泌干扰物等物质的去除方面展现出显著效果，中试装置运行结果显示，采用紫外光源（254 nm）配合 TiO_2 薄膜反应器时，COD 去除率能达到 60%，色度去除率超过 80%，近年来，研究者通过掺杂金属离子（如 Fe^{3+} 、N、Ag）或复合石墨烯等导电材料，提高了 TiO_2 的光响应范围与电子传输效率，实现了可见光条件下的高效反应，此外，光催化技术可与膜分离、臭氧氧化等工艺结合构建复合系统，以增强有机物降解能力和抗污性能。

（三）电化学与 Fenton 类反应应用

电化学氧化与 Fenton 类反应技术在城市污水深度处理中的应用愈发广泛，尤其在处理高浓度难降解有机废水时展现出显著优势。电化学氧化技术通过阳极反应直接生成羟基自由基或活性氯物种，实现对污染物的高效氧化，其中，硼掺杂金刚石（BDD）电极因具备高电化学稳定性和强氧化能力，被视作最具发展潜力的阳极材料，另一方面，Fenton 反应利用 Fe^{2+} 催化 H_2O_2 分解产生 $\cdot\text{OH}$ ，反应速率快、处理效果显著，但存在铁泥生成及 pH 依赖性强等问题，为克服这些不足，电 - Fenton 与光 - Fenton 等复合体系逐步发展起来，电 - Fenton 通过阴极电还原生成 H_2O_2 并实现 Fe^{2+} 再生，能够实现连续运行并减少化学品投加量；光 - Fenton 在紫外或可见光照射下促进 Fe^{3+} 还原，提高羟基自由基生成效率，实验与工程研究表明，电 - Fenton 体系对酚类、抗生素及染料废水等难降解物的 COD 去除率可达 80% 以上，且出

水 BOD₅/COD 比值显著提高,有利于后续生物处理环节的进行,综合来看,电化学与 Fenton 类技术在城市污水深度净化中具备高效、可控、可集成的特点,为实现低碳化与智能化水处理提供了新的技术路径。

三、工程化应用的技术瓶颈与挑战

(一) 成本与能耗问题

先进氧化技术(AOPs)在实验室与中试阶段展现出良好的污染物去除效果,但进入工程化应用环节后,普遍面临运行成本偏高与能耗较大的问题。其高能耗特点主要源于臭氧发生器的电力消耗、光催化体系所需的光源能量输入,以及电化学体系维持电流的能源需求,以具体技术为例,臭氧氧化需借助高压放电设备制备高浓度臭氧,该过程的能量转换效率仅为 10%~20%;光催化氧化需依靠紫外光或强可见光照射激发半导体材料,这一需求导致电能消耗或灯源维护成本明显上升;电化学体系则需维持较高电流密度,以保障羟基自由基持续生成,进而进一步增加能耗支出,除此之外,药剂成本也是构成经济负担的重要因素,尤其是 Fenton 类体系中 H₂O₂与 Fe²⁺的投加量相对较大,会直接推动化学药剂费用上涨,针对上述问题,研究者提出了多种优化策略:一是开展能量集成与反应器结构改进工作,例如采用多相催化反应器、微气泡臭氧化系统等装置,在提升氧化效率的同时降低能耗;二是引入可再生能源,比如利用光伏电源驱动电化学体系,或采用太阳光替代紫外光进行照射,以此降低能源成本;三是通过催化剂再生与反应条件优化,减少化学药剂的消耗量,从而提升技术整体的经济性。

(二) 设备与运行维护

AOPs 的稳定运行离不开设备性能与维护水平的支撑,而设备耐久性不足与系统控制难度大,是制约其工程化推进的重要因素之一。在电化学体系中,BDD、Ti/IrO₂、PbO₂等阳极材料直接影响反应效率与设备使用寿命,但部分电极材料存在腐蚀或钝化现象,会导致电流效率下降,光催化体系中,光源老化、光强衰减以及催化剂沉积失活等问题,同样会使反应速率降低,臭氧系统则需要定期对放电管与气体分配装置进行维护,以防止臭氧泄漏与反应不均匀情况的发生,在运行控制层面,由于 AOPs 反应涉及自由基生成与瞬时反应链,系统对 pH 值、温度、反应时间及反应剂浓度的敏感度较高,参数稍有偏差就可能导致处理效率骤降或副反应加剧,为提升系统运行可靠性,工程领域逐渐引入自动化监控与智能控制技术,通过在线监测氧化还原电位(ORP)、溶解氧、COD 等关键参数,实现对反应过程的精细化调节。

(三) 副产物与环境安全风险

尽管 AOPs 以处理高效性为主要优势,但在实际应用过程中,仍可能产生一定的副产物并带来环境安全风险。例如,臭氧氧化过程中,臭氧与水体中的溴离子发生反应,会生成具有毒性的溴酸盐(BrO₃⁻);光催化氧化过程中可能产生低分子量有机酸或醛类中间体,若这些中间体未能完全处理,反而会增加水体的生物毒性;Fenton 反应产生的含铁污泥需要进行妥善处置,否则

容易造成二次污染,电化学氧化体系中,则可能生成氯酸盐、过氯酸盐等有害无机副产物,对生态环境构成潜在威胁,为降低这些不利影响,应在工艺设计阶段强化副产物监控与控制措施,一方面,通过选择适宜的反应条件与催化剂(如非氯反应体系、掺杂金属催化剂等),抑制有害副产物的生成;另一方面,可采用多级处理模式,如将 AOPs 与生物处理或吸附工艺相结合,进一步去除残余的中间产物。

四、技术融合与未来发展方向

(一) 与生物处理的耦合技术

先进氧化技术(AOPs)与生物处理方法的耦合,已成为污水深度处理领域的重要发展方向。AOPs 能够将难降解有机污染物氧化转化为小分子有机酸、醛酮类等易于生物降解的物质,进而提高废水的可生化性(也就是提升 BOD₅/COD 比值),为后续生物处理环节创造有利条件,以具体工艺为例,臭氧-生物活性炭(O₃-BAC)工艺通过臭氧氧化破坏有机物分子结构,再经由生物膜的降解作用,实现污水的深度净化与出水水质的持久稳定;光-Fenton-生物处理体系则借助 Fenton 反应快速分解难降解物质,随后利用活性污泥或生物滤池去除残余污染物,实践结果表明,这类复合工艺不仅能显著提升污染物去除效率,还能减少化学药剂的投加量与污泥的产生量,实现经济性与环保性的双重优化。

(二) 与膜分离及吸附技术结合

AOPs 与膜分离、吸附等物理化学技术的结合,在城市污水深度净化过程中展现出强大的协同效应,AOPs-膜分离体系(如 AOPs-MBR、AOPs-RO)利用 AOPs 的强氧化作用降解污染物,同时防止膜组件发生污染,延长膜的使用寿命、提高膜通量;与此同时,膜分离能够拦截水中残余的颗粒物与副产物,进一步提升出水水质,AOPs 与吸附技术的耦合(如光催化-活性炭、臭氧-沸石体系)则借助吸附材料对污染物的浓缩作用,在材料表面促进自由基反应,实现污染物的同步富集与降解。

(三) 智能化与绿色发展趋势

未来 AOPs 的技术发展将聚焦智能化、低碳化与可持续化三大方向持续推进。在技术优化层面,人工智能与大数据技术的深度融入,能够为 AOPs 系统搭建实时监测与自动控制体系,算法可对反应时长、能量消耗及药剂投放量进行精准优化,进而保障系统实现精准调控与高效运转;在绿色发展层面,绿色能源与 AOPs 技术的结合已成为关键发展路径,光伏驱动的电化学氧化、太阳能支撑的光催化等技术手段,能够有效降低系统运行过程中的碳足迹,新型催化材料的研发工作,像可见光响应型半导体、碳基催化剂、金属有机框架材料 MOFs 等,还能进一步增强 AOPs 的反应活性并提升其使用耐久性。

五、结语

先进氧化技术作为城市污水深度治理的重要手段,依托自身强氧化性与广谱降解能力,在难降解有机物去除领域彰显出巨大

潜力。但该技术存在的高能耗、高成本及副产物风险问题，依旧是制约其广泛推广的关键因素，未来的发展方向应集中在多技术耦合、催化材料创新与系统智能化优化方面，通过与生物处理法、膜分离技术及吸附技术的协同应用，构建高效、低碳、可持

续的污水处理模式，随着科技水平的提升与工程应用经验的积累，AOPs 将在打造清洁、安全、循环的城市水环境体系中，发挥更为核心的作用。

参考文献

- [1] 杨政龙, 宋丽洁. “双碳”背景下城市污水处理技术的发展及展望 [J]. 清洗世界, 2024, 40(12): 78-81. DOI: CNKI: SUN: HXQX. 0. 2024-12-026.
- [2] 陈思, 王政攀, 邓颖, 等. 基于生态环保的水利工程污水治理研究 [J]. 清洗世界, 2024, 40(12): 160-162. DOI: CNKI: SUN: HXQX. 0. 2024-12-053.
- [3] 王艳平. 农村生活污水治理的困境与对策探究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(24): 119-121. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2024-24-41.
- [4] 刘冠鹏, 朱红生, 陈家凯, 等. 农村生活污水治理站运行现状及分析——皖北、皖南、苏南部分地区 [J]. 工程建设与设计, 2024, (24): 253-256. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.12.283.
- [5] 王海燕, 王辉, 杨宏, 等. 基于生态环境特征的城市流域分区综合治理体系研究——以乐山市为例 [J]. 环境保护与循环经济, 2024, 44(12): 52-56. DOI: CNKI: SUN: LNCX. 0. 2024-12-011.
- [6] 胡隆欢, 黄静岩. 西部黄土高原地区海绵城市系统化实施方案编制研究 [J]. 建设科技, 2024, (24): 72-74. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2024.24.019.