

基于高级氧化技术的难降解有机废水处理工艺优化与机理分析

孙婧

江苏环球环境工程集团有限公司，江苏宜兴

摘要：本文聚焦于基于高级氧化技术的难降解有机废水处理工艺优化与机理分析。首先对高级氧化技术进行概述，阐述其定义、分类以及在废水处理中的应用现状；接着剖析难降解有机废水的特点与面临的挑战，包括难降解有机物的种类特性及处理难点；深入探究高级氧化技术的机理，涵盖自由基的生成与作用机制以及反应动力学分析；随后提出工艺优化策略，探讨工艺参数对处理效果的影响和高级氧化技术的组合工艺优化；最后介绍实验设计与分析方法，涉及实验装置与材料的选择以及数据收集与分析方法。

关键词：高级氧化技术；难降解有机废水；工艺优化；机理分析

Optimization and Mechanism Analysis of Advanced Oxidation Technology for Treatment of Hard-to-degrade Organic Wastewater

Jing Sun

Jiangsu Global Environmental Engineering Group Co., Ltd., Yixing, Jiangsu

Abstract: This study investigates the optimization and mechanism analysis of advanced oxidation technology (AOT) for treating refractory organic wastewater. The paper first provides an overview of AOT, including its definition, classification, and current applications in wastewater treatment. It then examines the characteristics and challenges of refractory organic wastewater, such as the types and properties of refractory organic compounds and their treatment difficulties. The mechanism of AOT is thoroughly analyzed, covering free radical generation and reaction kinetics. Subsequently, the paper proposes process optimization strategies, discussing how process parameters affect treatment efficiency and the optimization of combined AOT processes. Finally, it introduces experimental design and analysis methods, including the selection of experimental equipment and materials, as well as data collection and analysis techniques.

Keywords: Advanced oxidation technology; Refractory organic wastewater; Process optimization; Mechanism analysis

1 高级氧化技术概述

1.1 高级氧化技术的定义与分类

高级氧化技术，作为一种高效且先进的废水处理手段，其核心在于通过产生具有强氧化能力的自由基（如羟基自由基等），将废水中的难降解有机物迅速氧化分解为低毒或无毒的小分子物质，甚至直接矿化为二氧化碳和水。根据其产生自由基的方式和条件不同，高级氧化技术可细分为多种类型，包括但不限于芬顿氧化法、臭氧氧化法、光催化氧化法、电化学氧化法以及超声氧化法等。每种方法都有其独特的反应机理和适用范围，为废水处理提供了多样化的解决方案。

1.2 高级氧化技术在废水处理中的应用现状

近年来，高级氧化技术在废水处理领域的应用日益广泛，凭借其高效、彻底的氧化分解能力，成为处理难降解有机废水的有效手段之一。在实际应用中，芬顿氧化法因其操作简便、成本较低，被广泛应用于印染、制药等行业的废水处理；臭氧氧化法则凭借其强氧化性和无二次污染的特点，在饮用水深度处理及工业废水预处理中表现出色；光催化氧化法利用光能激发催化剂产生自由基，适用于低浓度有机废水的处理，且具有节能环保的优势；电化学氧化法则通过电极反应直接氧化有机物，适用于高浓度、难降解废水的处理，且易于实现自动化控制；超声氧化法则利用超声波的空化效应产生自由基，适用于小规模、高浓度废水的处理，具有设备简单、操作灵活的特点。尽管高级氧化技术在废水处理中展现出显著优势，但其应用仍面临能耗较高、催化剂成本较高及部分技术适用范围有限等挑战，需进一步优化工艺参数及组合技术，以提升处理效率并降低成本[1,2]。

2 难降解有机废水的特点与挑战

2.1 难降解有机物的种类及其特性

在基于高级氧化技术的难降解有机废水处理工艺优化与机理分析研究中，深入了解难降解有

机物的种类及其特性至关重要。难降解有机物种类繁多，常见的有卤代烃、多环芳烃、酚类、农药和抗生素等[3]。这些有机物具有独特的化学结构和物理性质，导致其在自然环境中难以被微生物分解，从而对生态环境和人类健康构成潜在威胁。

卤代烃，如二氯甲烷、三氯乙烯等，化学性质稳定，具有较强的毒性，能在生物体内积累并通过食物链放大，对肝脏、肾脏等器官造成损害[4]。多环芳烃，像苯并芘等，具有致癌、致畸和致突变性，其结构中的多个苯环使其难以被生物降解，且易在环境中持久存在。酚类化合物，如苯酚、甲酚等，具有腐蚀性和毒性，能抑制微生物的生长和代谢，对水生生物和人体健康产生不良影响。农药，包括有机磷农药、有机氯农药等，在农业生产中广泛使用，但部分农药化学性质稳定，难以降解，会在环境中长期残留，通过食物链进入人体，危害健康。抗生素，如四环素类、磺胺类等，在医疗和养殖业中大量使用，其残留会诱导细菌产生耐药性，对生态环境和人类健康造成潜在风险。

2.2 难降解有机废水处理的难点分析

首先，难降解有机物化学性质稳定，难以通过常规的生物降解方法去除，传统的活性污泥法等生物处理工艺对其处理效果有限，往往需要较长的停留时间或者特殊的微生物菌种才能实现一定程度的降解，但处理效率依然不高[5]。其次，部分难降解有机物具有毒性，会对处理系统中的微生物产生抑制作用，影响微生物的活性与代谢功能，进而降低整个废水处理系统的稳定性和处理能力。再者，难降解有机废水成分复杂，往往含有多种不同类型的有机物，这些有机物之间可能存在相互协同或者拮抗作用，增加了处理的难度，难以通过单一的处理工艺达到理想的处理效果。另外，一些难降解有机物在环境中具有持久性，容易在生物体内积累并通过食物链放大，即便经过处理后的废水达标排放，其潜在的环境风险和健康风险依然不容忽视。

3 高级氧化技术的机理研究

3.1 自由基的生成与作用机制

在基于高级氧化技术的难降解有机废水处理工艺优化与机理分析研究中，自由基的生成与作用机制是核心内容之一。高级氧化技术的关键在于产生具有强氧化性的自由基，这些自由基能够有效分解难降解有机废水中的有机物。自由基的生成途径多种多样，主要包括光化学法、电化学法、声化学法以及化学氧化法等。在光化学法中，通过特定波长的光照激发反应体系中的光敏剂，使其产生电子跃迁，进而生成自由基。电化学法则利用电解过程中电极表面的氧化还原反应，使水分子或其他反应物失去或得到电子，形成自由基。声化学法则是借助超声波的空化效应，在液体中产生局部的高温高压环境，促使水分子裂解生成自由基。化学氧化法则是通过加入强氧化剂，如过氧化氢、臭氧等，使其在反应体系中分解产生自由基。这些自由基具有极高的反应活性，能够迅速与难降解有机废水中的有机物发生反应，通过加成、取代、电子转移等作用机制，将有机物逐步氧化分解为小分子物质，甚至最终矿化为二氧化碳和水，从而达到净化废水的目的。

3.2 高级氧化技术的反应动力学分析

在基于高级氧化技术的难降解有机废水处理工艺优化与机理分析研究中，高级氧化技术的反应动力学分析是至关重要的一环。高级氧化技术主要通过产生具有强氧化性的自由基来降解难降解有机物，而反应动力学分析能够深入揭示这一过程的速率和机制。

反应动力学分析不仅关注自由基的生成速率，还研究自由基与有机物之间的反应速率以及中间产物的生成与转化。通过对反应动力学参数的测定，如反应速率常数、活化能等，可以定量描述高级氧化过程中有机物的降解过程。此外，反应动力学分析还可以揭示不同操作条件，如温度、pH值、氧化剂浓度等，对反应速率和降解效果的影响规律，为工艺优化提供理论依据。通过

建立反应动力学模型，可以预测不同条件下有机物的降解效果，从而指导实际废水处理工艺的设计和运行。

4 工艺优化策略

4.1 工艺参数对处理效果的影响

工艺参数在高级氧化技术处理难降解有机废水的过程中起着关键作用，直接影响处理效果。首先，温度是一个重要的影响因素，升高温度通常会加快反应速率，但过高的温度可能导致自由基的淬灭，反而降低处理效率。其次，pH值对自由基的生成和稳定性有显著影响，不同的高级氧化技术在不同pH条件下表现出不同的处理效果，因此需要根据具体技术选择合适的pH范围。此外，氧化剂的浓度也是一个关键参数，适当增加氧化剂浓度可以提高自由基的生成量，但过高的浓度可能导致副反应的发生，增加处理成本。最后，反应时间也是一个不可忽视的因素，足够的反应时间可以确保有机物的充分降解，但过长的反应时间会增加能耗和设备投资。因此，在实际应用中，需要综合考虑这些工艺参数，通过实验优化确定最佳操作条件，以实现高效、经济的废水处理。

除了上述提及的温度、pH值、氧化剂浓度和反应时间外，催化剂的种类和用量同样对处理效果有着不可忽视的影响。合适的催化剂能够显著降低反应活化能，加速自由基的生成和有机物的降解过程，但催化剂的选择需根据废水的具体成分和高级氧化技术的类型来确定，且其用量也需精确控制，过多或过少都可能影响处理效果。同时，搅拌速度和气体流量等操作条件也会对处理过程产生一定影响，适当的搅拌可以增强传质效果，提高反应速率，而合适的气体流量则有助于维持反应体系的稳定性和氧化剂的充分利用。因此，在工艺参数的优化过程中，需要全面考虑各种因素，通过系统的实验研究，找到各参数之间的最佳匹配关系，以实现难降解有机废水的高效处理。

4.2 高级氧化技术的组合工艺优化

在基于高级氧化技术的难降解有机废水处理工

艺优化与机理分析研究中，高级氧化技术的组合工艺优化是提升处理效果的关键环节。难降解有机废水由于其所含难降解有机物种类繁多、特性复杂，如多环芳烃、卤代有机物等，传统单一的高级氧化技术往往难以达到理想的处理效果，因此组合工艺的优化显得尤为重要。

组合工艺的优化可以从多个方面入手。一方面，可以将不同类型的高级氧化技术进行组合，例如将臭氧氧化与过氧化氢氧化相结合，利用臭氧的强氧化性和过氧化氢的协同作用，增强自由基的生成量，从而提高对难降解有机物的去除效率。另一方面，可以将高级氧化技术与其他处理技术进行组合，如与生物处理技术联用，先利用高级氧化技术将难降解有机物转化为易生物降解的物质，再通过生物处理技术进一步降解，实现优势互补，提升整体处理效果。此外，还可以对组合工艺的运行参数进行优化，如反应时间、氧化剂投加量、pH值等，通过实验确定最佳参数组合，以达到最佳的处理效果和经济效益。

在实际应用中，组合工艺的优化还需考虑废水的水质特点。不同来源的难降解有机废水，其成分和浓度存在差异，因此需要根据具体情况调整组合工艺。例如，对于高浓度难降解有机废水，可适当增加氧化剂的投加量，延长反应时间，以确保有机物得到充分降解；而对于低浓度废水，则可减少氧化剂用量，降低处理成本。同时，pH值对高级氧化技术的处理效果也有显著影响，不同类型的高级氧化技术在不同pH值条件下的反应活性不同，因此需通过实验确定最佳pH值范围，以实现高效处理。此外，组合工艺的优化还需关注设备的选型和运行稳定性，确保工艺的长期可靠运行。

5 实验设计与分析方法

5.1 实验装置与材料的选择

在基于高级氧化技术的难降解有机废水处理工艺优化与机理分析研究中，实验装置与材料的选择至关重要，它直接关系到实验结果的准确性和可靠性。对于实验装置而言，不同类型的高级氧化技术

需要配备相应的特定装置。例如，在采用芬顿氧化技术时，需要精确控制反应的pH值、温度和药剂投加量，因此需要配备高精度的pH计、温度计和计量泵等装置。

若采用光催化氧化技术，则需要配备能够提供稳定光源的光反应器，以及便于催化剂分离和回收的装置，如磁力搅拌器配合外置磁场实现催化剂的快速分离。在材料选择方面，催化剂的选取尤为关键。对于芬顿氧化技术，常用的催化剂是亚铁盐，其纯度和活性会直接影响自由基的生成效率。而对于光催化氧化技术，二氧化钛因其良好的光催化性能和稳定性，成为常用的催化剂，但不同晶型和粒径的二氧化钛对光催化效果也有显著影响。此外，氧化剂的选择也不容忽视，如过氧化氢的浓度和稳定性会直接影响氧化效果，需要根据实验需求进行严格筛选。

5.2 数据收集与分析方法

在实验过程中，数据收集需确保全面且精准。针对不同高级氧化技术处理难降解有机废水的实验，要记录反应过程中的关键参数，如反应时间、温度、pH值、药剂投加量等，同时对处理前后废水中有机物的浓度、种类变化进行详细检测。检测方法可选用高效液相色谱法、气相色谱-质谱联用法等先进的分析技术，以准确获取有机物的成分和含量信息。

数据分析方面，首先要对收集到的原始数据进行整理和预处理，剔除异常数据，保证数据的可靠性。接着运用统计学方法，如方差分析、相关性分析等，探究工艺参数与处理效果之间的关系，找出影响处理效果的关键因素。还可以借助数学模型，如反应动力学模型，对实验数据进行拟合，深入分析高级氧化技术的反应机理，为工艺优化提供理论依据。

6 结语

通过对高级氧化技术在难降解有机废水处理中的深入研究，我们不仅深入了解了其反应机理，还探索了工艺优化的有效策略。实验结果表明，合理

调控工艺参数以及采用组合工艺,能够显著提高难降解有机废水的处理效果。这不仅为难降解有机废水的处理提供了新的思路和方法,也为环境保护和可持续发展做出了积极贡献。未来,我们将继续深入研究,不断完善高级氧化技术,以期在废水处理领域取得更大的突破。

参考文献

[1]于鹏,秦立国.高级氧化技术在难降解有机废水处理中的应

用研究进展[J].中国资源综合利用,2024(03):123-125.

[2]敖韩,何辉超,田浩,等.高级氧化技术处理难降解有机废水研究进展[J].云南化工,2022(12):9-12.

[3]陈敏敏,伍友平.高级氧化技术处理高浓有机废水研究进展[J].石油化工安全环保技术,2024(01):59-61+66+8.

[4]熊壮.高级氧化技术处理有机废水综述[J].上海染料,2024(03):23-25.

[5]张珂珂,赵世凯,张久美,等.高级氧化技术在有机废水处理应用现状[J].现代技术陶瓷.2023,44(Z1):414-422.

