

基于高级氧化技术的水处理过程优化

黄健

上海复旦水务工程技术有限公司, 上海 200433

摘要：本文研究了基于高级氧化技术的水处理过程优化。高级氧化技术具有高效、低耗、环保等优点，在水处理领域得到了广泛应用。本文首先介绍了高级氧化技术的原理和分类，然后分析了不同高级氧化技术在水处理中的应用情况。其次，本文提出了基于高级氧化技术的水处理过程优化策略，包括添加适量的前驱体、控制反应条件、调整反应器结构等。最后，本文通过实验验证了所提出的优化策略的有效性，并探讨了其优缺点。

关键词：高级氧化技术；水处理；过程优化；前驱体；反应条件；反应器结构

Optimization of Water Treatment Process Based on Advanced Oxidation Technology

Huang Jian

Shanghai Fudan Water Engineering and Technology CO. Ltd, Shanghai 200433

Abstract：This paper studies the optimization of water treatment process based on advanced oxidation technology. Advanced oxidation technology has the advantages of high efficiency, low consumption and environmental protection, and has been widely used in the field of water treatment. This paper firstly introduces the principle and classification of advanced oxidation technology, and then analyzes the application of different advanced oxidation technologies in water treatment. Secondly, this paper puts forward the optimization strategy of water treatment process based on advanced oxidation technology, including the addition of appropriate amount of precursors, control of reaction conditions, adjustment of reactor structure and so on. Finally, this paper verifies the effectiveness of the proposed optimization strategy through experiments and discusses its advantages and disadvantages.

Key words：advanced oxidation technology; water treatment; process optimization; precursor; reaction conditions; reactor structure

引言

随着社会经济的快速发展，我国水资源问题日益突出，水质污染问题严重威胁着人们的日常生活和生态环境。传统的水处理过程，如沉淀、生物降解等，往往难以达到理想的处理效果，而且运行维护成本较高。近年来，高级氧化技术作为一种新型、高效的水处理技术，逐渐受到了广泛关注。高级氧化技术通过产生高活性氧化物质，如羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）等，对水中的有机污染物进行氧化分解，具有处理效果好、操作简便、成本低等优点。因此，本研究旨在探讨基于高级氧化技术的水处理过程优化策略，以期提高水处理效果，降低运行成本，为我国水处理技术的发展提供理论依据和实践指导。

一、高级氧化技术概述

1. 高级氧化技术的定义

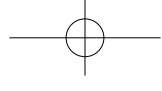
高级氧化技术（Advanced Oxidation Technologies, AOT）是一种利用强氧化物质（如臭氧、羟基自由基、光催化氧化等）对有机污染物进行氧化分解的技术。是处理难降解有机废水最高效方法之一，其核心是通过向废水中输入能量（光能、电能、热能）和/或化学药品（ O_3 , H_2O_2 ）等。^[1]与传统的水处理方法相比，高级氧化技术具有处理效率高、氧化能力强、氧化产物无害等优点，被认为是未来水处理领域的发展方向。

2. 高级氧化技术的基本原理

高级氧化技术的基本原理是通过强氧化物质对有机污染物进行氧化反应，将有机物分解成无害的简单物质，如二氧化碳、水等。这一过程可以有效地去除水中的难降解有机物、生物难降解物、致病微生物等污染物。高级氧化技术是一种在常温常压状态下运行的废水处理技术，通过羟基自由基等基团的氧化作用破坏金属离子与配体之间的强化学键，并以自由离子的形式释放重金属。^[2]

3. 高级氧化技术的分类

（1）臭氧氧化技术：利用臭氧氧化剂氧化有机污染物，生成无害的氧化产物。臭氧氧化技术有氧化能力强、处理效率高、无



二次污染等优点。

(2) 羟基自由基氧化技术：利用羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 氧化有机污染物，生成无害的氧化产物。羟基自由基是一种高度活性的氧化剂，能有效地氧化水中的有机物质。

二、高级氧化技术的水处理过程优化分类

1. 臭氧氧化：臭氧是一种强氧化剂，臭氧因具有强氧化性可以有有效的氧化多种有机物的特性成为一种重要的强氧化剂。^[3] 可以将有机物氧化成无害物质。臭氧氧化可以用于水处理中的氧化降解、消毒和脱色等应用。

2. Fenton 氧化：Fenton 氧化是一种利用铁盐和氢氧化物产生氧化还原反应的过程，能够产生强氧化性的活性物质—— $\cdot\text{OH}$ ，进而可以实现水中有机物的降解矿化。^[4] 可以用于降解有机污染物和重金属离子。

3. 光催化氧化：光催化氧化是一种利用光能产生氧化还原反应的过程，可以使用光催化剂（如二氧化钛）来降解有机污染物和重金属离子。光化学氧化工艺指在可见光或紫外线照射下使有机物质氧化分解而产生的光化学反应流程，此工艺利用了紫外线辐射，在半导体上形成了具备强大的抗氧化功能的原子-空穴对，使废水中 OH^- 和 H_2O 分子氧化成自由基 $\cdot\text{OH}$ 。^[5]

4. 其他高级氧化技术：除了上述三种技术之外，还有一些其他的高级氧化技术，如电催化氧化、电化学氧化、湿式氧化等，这些技术也可以用于水处理中的氧化降解、脱色和消毒等应用。电化学氧化法是基于电化学反应生成 $\cdot\text{OH}$ 强氧化剂，通过 $\cdot\text{OH}$ 有效降解有机物，直至有机物完全降解。^[6]

三、高级氧化技术的工作原理

该技术的工作原理一般是通过产生高活性氧化剂来氧化水中的有机污染物。在高级氧化技术中，通常使用一种或多种氧化剂，如羟基自由基或臭氧，与水中的有机物发生反应，将其氧化成无害的二氧化碳和水。常规氧化剂 H_2O_2 以及 Fenton 氧化均有较为严苛的 pH 条件，臭氧 (O_3) 氧化则存在操作成本高等问题。然而 SR-AOPs 很好的规避了上述不足。^[7] 这种反应通常在反应器中进行，反应器中的条件和氧化剂的浓度会影响氧化剂的产生和反应的效率。在反应过程中，羟基自由基是一种非常活泼的氧化剂，能够与有机物发生反应，将其氧化成无害的二氧化碳和水。羟基自由基的产生可以通过使用特定的催化剂，如二氧化钛 (TiO_2)，来促进氧化反应。臭氧也是一种常用的氧化剂，它可以被产生于反应器中，并与水中的有机物发生反应。

四、水质监测与分析方法

1. 常规水质参数监测

常规水质参数包括 pH 值、氧化还原电位 (ORP)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、化学需氧量 (COD)、生物需氧量 (BOD) 等。这些参数

可以反映水质的基本状况，对于评估水处理效果和污染程度非常有用。

2. 元素监测

元素监测可以检测水体中的各种元素，如钙、镁、铁、锌等。这些元素是水体的常见污染物，对于评估水处理效果和污染程度非常有用。常用的方法包括电感法、原子吸收法、ICP-AES 等。结合废水类型、元素含量，明确技术应用规范，优化高级氧化技术流程，严格控制废水处理、排放过程，确保废水在高级氧化技术的作用下能够彻底清除有害杂质。^[8]

3. 水质分析

水质分析是根据水体的具体情况和处理要求，对水中的各种成分进行分析，以评估水处理效果和污染程度，以及制定相应的处理策略。常用的方法包括液相色谱、气相色谱、质谱法等。

五、常规水处理技术及其优缺点

常规的水处理技术包括物理、化学和生物处理技术。

1. 物理处理技术：

物理处理技术主要利用物理原理去除水中的有害物质。常见的物理处理技术包括过滤、沉淀、离心、膜分离等。

优点：物理处理技术通常操作简单、设备投资较低，能够有效去除水中的颗粒和悬浮物等有害物质。是一种高效、低成本的废水处理技术，可降解工业废水中卤代化合物、硝基芳香族化合物、偶氮染料和高价有毒金属等难降解污染物^[9]。

缺点：物理处理技术对水中的溶解性有机物和重金属去除效果较差，而且可能会产生一些二次污染，如滤饼污染、沉淀物污染等。

2. 化学处理技术：

化学处理技术是通过向水中添加化学物质，使有害物质发生化学反应，转化为无害或低危害的物质。常见的化学处理技术包括氧化、还原、沉淀、吸附等。

优点：化学处理技术对溶解性有机物、重金属和细菌等有害物质的去除效果较好，操作也相对简单。不受废水组分、浓度和种类的限制，能在短时间内实现对有机污染物的完全降解，非常适合处理难降解有机废水。^[10]

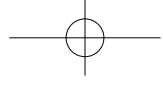
缺点：化学处理技术可能会产生一些二次污染，如水生生物污染、化学物质残留等。而且，化学处理技术的成本相对较高，需要持续添加化学物质。

3. 生物处理技术：

生物处理技术是利用微生物的代谢作用，将水中的有害物质转化为无害或低危害的物质。常见的生物处理技术包括活性污泥法、生物膜法、生物滤池法等。

优点：生物处理技术能够有效去除水中的有机物和氮、磷等营养物质，对水体的污染较小，而且操作也相对简单。

缺点：生物处理技术需要较长的处理时间，而且可能会产生一些恶臭和二次污染。此外，需要持续投加有机物作为营养物质，以保证生物处理效果。



六、高级氧化技术与水处理过程中常见问题的处理

1. 有机污染物

高级氧化技术可以有效降解有机污染物，如蛋白质、糖类和脂肪等。常见的处理方法包括臭氧氧化、Fenton 氧化和光催化氧化等。臭氧氧化是一种常用的方法，可以在短时间内降解水中的有机物质，适用于处理工业废水、生活污水等。Fenton 氧化是一种利用铁盐和氢氧化物产生氧化剂的方法，适用于处理含有高浓度有机物质的废水。光催化氧化是一种利用光能产生氧化剂的方法，适用于处理水中的有机物质，并且不会产生额外的化学物质。

2. 重金属离子

高级氧化技术也可以有效去除水中的重金属离子，如铅、铜、镍和锌等。常见的处理方法包括电化学氧化、臭氧氧化和光催化氧化等。电化学氧化是一种利用电流产生氧化剂的方法，适用于处理含有高浓度重金属离子的废水。臭氧氧化和光催化氧化也是常用的方法，可以降解水中的重金属离子，并且不会产生额外的化学物质。

3. 微生物和细菌

高级氧化技术也可以有效去除水中的微生物和细菌。常见的处理方法包括臭氧氧化、Fenton 氧化和光催化氧化等。臭氧氧化和 Fenton 氧化可以快速杀灭水中的微生物和细菌，适用于处理含有高浓度微生物和细菌的废水。光催化氧化也可以有效去除水中的微生物和细菌，并且不会产生额外的化学物质。

七、高级氧化技术在水处理领域的未来发展趋势与展望

1. 技术不断进步，提高氧化剂的性能

未来，高级氧化技术将不断吸引更多的研究者进行深入研究，从而进一步提高氧化剂的性能。这包括寻找更多具有高氧化还原电位、高稳定性的氧化剂，如金属氧化物、光催化剂等，以及优化现有氧化剂的制备工艺，降低成本，提高效率。

2. 更广泛的应用场景

高级氧化技术在水处理领域的应用场景将不断拓宽，不仅限于传统的水处理工艺，如饮用水处理、废水处理等，还包括土壤

修复、水体富营养化治理等领域。此外，高级氧化技术还可以与其他水处理技术相结合，如臭氧氧化、Fenton 氧化等，实现多种技术的优势互补，提高处理效果。

3. 设备智能化发展

随着物联网、大数据等技术的快速发展，未来高级氧化水处理设备将实现更高层次的智能化。设备将具有自动监测、远程控制等功能，能够根据处理过程中的实时数据，自动调整氧化剂的添加量、反应条件等，从而提高处理效果。此外，智能设备还可以通过与其他系统相结合，实现数据的实时共享，为水处理领域的科研、教学、工程应用等提供更有力的支持。

4. 绿色、可持续发展

未来高级氧化技术将在绿色、可持续发展方面取得重要突破。通过研究新型绿色氧化剂、降低氧化剂的制备成本等途径，降低整个水处理过程的能耗和污染，实现水处理技术的绿色化。此外，高级氧化技术还可以与循环经济相结合，实现废水的资源化利用，减少对环境的压力。

5. 政策支持与推广

随着我国政府对水资源问题的重视，未来高级氧化技术将得到更多的政策支持与推广。政府将加大对高级氧化技术研究和应用的支持力度，包括资金投入、税收优惠等措施，鼓励相关企业和研究机构进行技术研发和产业化推广。此外，政府还将推动高级氧化技术在水处理行业的普及，提高水处理技术的整体水平。

八、结束语

在本论文中，针对当前水质问题，展开了基于高级氧化技术的水处理过程优化研究。高级氧化技术作为一种高效、环保的水处理方法，已经在我国得到广泛应用。本文通过分析高级氧化技术的工作原理、优缺点以及处理效果，提出了一套针对性的优化策略。这一策略旨在提高水处理过程的效率、降低运行成本、减少二次污染，并充分展示了高级氧化技术在实际应用中的优势。通过本研究，我们对高级氧化技术的理解和认识得到了进一步提升，为我国水处理行业的发展提供了新的技术支持。我们相信，随着高级氧化技术的不断发展和完善，其在水处理领域的应用将越来越广泛，为解决我国水质问题、实现水资源的可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 孙怡. 高级氧化技术的阳极强化及耦合生物法处理难降解有机废水 [D]. 浙江大学, 2020. DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.001823.
- [2] 赵玄, 高文艳, 周曦琳等. 废水中络合态重金属形态、去除机制及净化技术研究进展 [J]. 燕山大学学报, 2022, 46(04):297-308.
- [3] 李俊生, 王学峰, 马娜等. 高级氧化技术在食品工业废水处理的研究进展 [J]. 水处理技术, 2023, 49(01):20-25. DOI:10.16796/j.cnki.1000-3770.2023.01.004.
- [4] 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, 49(12):9-12.
- [5] 田云福, 冯晓琴, 宋江锋等. 高级氧化技术在高 COD 废水处理过程中的应用进展 [J]. 山西化工, 2022, 42(07):44-49. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2022.07.015.
- [6] 宫震, 付田雨, 孙好芬等. 高级氧化技术处理印染废水研究进展 [J]. 湿法冶金, 2022, 41(04):283-288. DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2022.04.001.
- [7] 周衍波, 宋奕强, 张永利等. 科学前沿在《普通化学》三重维度课程改革探究:以高级氧化技术为例 [J]. 广东化工, 2022, 49(24):246-247+252.
- [8] 陈卓. 简述医疗废水处理中高级氧化技术应用 [J]. 清洗世界, 2022, 38(10):81-83.
- [9] 尹前, 王毅博, 陈志豪等. 臭氧高级氧化技术处理印染废水的性能对比 [J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(03):83-92. DOI:10.13338/j.issn.1674-649x.2022.03.011.
- [10] 周锐, 米宏伟, 王艳宜等. 高级氧化技术处理难降解有机污染物研究进展 [J]. 广州化工, 2022, 50(18):7-9+31.