

# 工业废水深度处理工艺的创新与发展趋势

吉鸿飞

中材建设有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17472

**[摘要]** 本文系统梳理了当前主流的工业废水深度处理技术,包括高级氧化法、膜分离技术、吸附法及生物强化工艺等,并深入剖析了其在实际应用中面临的挑战。在此基础上,重点探讨了近年来涌现出的创新性工艺,如电化学耦合技术、催化臭氧氧化、正向渗透(FO)、厌氧膜生物反应器(AnMBR)以及基于人工智能的智能优化控制系统等。文章进一步从“双碳”目标、循环经济、智慧水务等宏观视角出发,研判了工业废水深度处理未来的发展趋势,指出多技术协同集成、材料科学驱动、过程低碳化与资源能源回收将成为核心发展方向。最后,本文提出了推动该领域高质量发展的政策建议与技术路径,以期对相关研究与工程实践提供理论参考。

**[关键词]** 工业废水; 深度处理; 高级氧化; 膜分离; 资源回收; 低碳技术; 智能控制

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A

## Innovation and Development Trends in Advanced Industrial Wastewater Treatment Technologies

Hongfei Ji

China National Materials and Construction Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper systematically reviews mainstream advanced industrial wastewater treatment technologies, including advanced oxidation processes, membrane separation technologies, adsorption methods, and bio-enhanced processes, and provides an in-depth analysis of their practical application challenges. On this basis, it focuses on recent innovative processes, such as electrochemical coupling technologies, catalytic ozonation, forward osmosis (FO), anaerobic membrane bioreactors (AnMBR), and AI-based intelligent optimization control systems. From macro perspectives like the "dual carbon" goals, circular economy, and smart water management, the article further analyzes future development trends in advanced industrial wastewater treatment, pointing out that multi-technology synergistic integration, materials science-driven advancements, process decarbonization, and resource-energy recovery will become core development directions. Finally, policy recommendations and technical pathways to promote high-quality development in this field are proposed, aiming to provide theoretical references for related research and engineering practices.

**[Key words]** Industrial Wastewater; Advanced Treatment; Advanced Oxidation; Membrane Separation; Resource Recovery; Low-Carbon Technologies; Intelligent Control

### 引言

工业是国民经济重要支柱,但生产产生大量废水,严重挑战水环境。工业废水成分复杂,含高浓度有机物、重金属等多种物质,具有毒性大、可生化性差、水质水量波动大等特点。传统处理工艺虽能去除大部分污染物,但面对严格排放标准和水资源回用需求时,往往难以达标。因此,深度处理作为污水处理的最后屏障,重要性日益突出。其旨在进一步去除二级处理难削减的微量污染物等,使出水满足回用或更高环境标准。近年来,在“绿水青山”理念和“双碳”目标引领下,工业废水深度处理被赋

予资源循环利用等新内涵,催生了技术创新并影响该领域未来走向。

### 1 工业废水深度处理的现状与挑战

#### 1.1 主流深度处理技术及其局限性

工业废水深度处理主要依赖以下技术:(1)高级氧化技术(AOPs):靠产生羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )无选择矿化或转化难降解有机物,常见形式多样,对COD等去除效果显著。不过运行成本高,可能生成有毒中间产物,处理高浓度废水效率受限。(2)膜分离技术:涵盖微滤、超滤等,RO和NF是废水脱盐与高品质回用的关

键。但存在膜污染、清洗频繁、能耗高问题,浓水处理与处置难题制约其广泛应用<sup>[1]</sup>。(3)吸附技术:利用多孔材料吸附污染物,操作简便、效果稳定。但吸附剂饱和后需再生或更换,有二次污染风险且成本高,新型材料大规模应用的经济性和稳定性待考。(4)生物强化技术:通过投加菌种等提升降解能力,如厌氧氨氧化工艺处理高氨氮废水有优势。但对水质变化敏感,启动周期长,对不可生化物质无效。

### 1.2 面临的挑战

综合来看,当前工业废水深度处理正面临三重交织的挑战。首先是经济性与可持续性的矛盾。许多高效技术,如高级氧化和反渗透,虽然处理效果优异,但其高昂的运行成本超出了多数企业的承受能力,导致先进技术难以在行业内大规模推广。其次是二次污染问题。深度处理过程本身并非“零负担”,无论是高级氧化产生的药剂残留、膜工艺产生的高污染浓水,还是废弃吸附剂的处置,都可能形成新的环境压力点,甚至抵消了前端治理的环境效益。最后是系统集成与智能化水平的不足。目前的工程实践多停留在单元技术的简单串联,缺乏针对特定行业废水水质特征的系统性、定制化集成方案。同时,自动化与智能化程度普遍偏低,难以根据水质的实时变化进行精准调控,导致能源和药剂的浪费,无法实现真正的高效、低碳运行。

## 2 工业废水深度处理工艺的创新进展

### 2.1 高级氧化技术的耦合与催化升级

为了突破单一高级氧化技术的瓶颈,研究者们正致力于通过技术耦合与催化升级来提升整体效能。一个典型的例子是电化学-芬顿耦合工艺,该工艺巧妙地利用电化学方法在反应体系中原位生成过氧化氢和亚铁离子,不仅避免了传统芬顿法中铁泥的大量产生,减少了污泥处置的负担,还实现了试剂的循环利用,显著降低了化学品的消耗和运行成本。与此同时,催化臭氧氧化技术通过引入金属氧化物或负载型催化剂,有效改变了臭氧的分解路径,大幅促进了羟基自由基的生成速率和产率,从而提高了对难降解有机物的矿化效率,并增强了对特定污染物的选择性氧化能力<sup>[2]</sup>。此外,过硫酸盐活化技术作为一种新兴的氧化路径,因其产生的硫酸根自由基具有更高的氧化电位、更长的半衰期以及更宽的pH适用范围,正逐渐展现出对某些顽固性有机污染物优于传统羟基自由基的降解潜力,为高级氧化家族注入了新的活力。

### 2.2 膜技术的革新与替代方案

面对传统压力驱动膜技术的固有缺陷,科研界积极探索全新的膜过程和颠覆性的膜材料。正向渗透(FO)技术便是其中的代表,它摒弃了高压泵送的模式,转而利用高浓度汲取液产生的自然渗透压差来驱动水分子透过膜,从根本上实现了极低的能耗。这一特性使其在处理高粘度、高污染倾向的工业废水时具有得天独厚的优势。当然,FO技术的商业化推广仍需攻克高效、低成本且易于回收的汲取液开发以及高性能抗污染FO膜制备等关键难题。另一方面,厌氧膜生物反应器(AnMBR)将高效的厌氧生物降解与精密的膜分离技术融为一体,在有效去除高浓

度有机物的同时,还能回收沼气这一清洁能源。AnMBR工艺不仅污泥产量极少,其整体运行能耗也远低于传统的好氧膜生物反应器,完美契合了“以废治废、产能减污”的绿色理念,尤其适用于食品、酿酒、制药等行业的高浓度有机废水处理。在材料层面,石墨烯氧化物膜、碳纳米管复合膜以及具备自清洁功能的智能涂层膜等前沿材料的研发,正试图从源头上解决膜污染和通量衰减问题,为膜技术的长远发展奠定坚实的物质基础。

### 2.3 资源与能源回收导向的集成工艺

当代工业废水深度处理的理念正在发生根本性转变,即从单纯的“污染物去除”迈向“城市矿山”或“资源工厂”。零液体排放(ZLD)正是这一理念的终极体现,它并非指某一项具体技术,而是一套高度集成的工艺路线,通常涵盖预处理、膜浓缩(如反渗透、电渗析)以及最终的蒸发结晶等单元,目标是将废水中的水分全部回收利用,而将污染物以固体盐的形式彻底分离出来。尽管ZLD系统的投资和运行成本居高不下,但对于水资源极度匮乏地区或环保要求极为严苛的行业(如煤化工、电力),它已成为不可或缺的解决方案。在资源回收方面,电渗析(ED)及其衍生的选择性电渗析(SED)技术展现出巨大潜力。它们利用离子交换膜和电场的协同作用,不仅能高效脱盐,更能通过使用单价选择性离子交换膜,实现一价与二价离子的有效分离,从而为锂、镍等有价值金属离子的定向回收开辟了新途径。更具革命性的是微生物电化学技术(METs),如微生物燃料电池(MFCs)和微生物电解池(MECs),它们巧妙地利用电活性微生物作为“生物催化剂”,将废水中有机物蕴含的化学能直接转化为电能或氢能,首次真正意义上实现了污染物去除与清洁能源生产的同步进行。

### 2.4 智能化与数字化赋能

人工智能、大数据和物联网等新一代信息技术的迅猛发展,正以前所未有的深度和广度赋能工业废水处理领域。基于机器学习算法构建的智能优化控制系统,能够通过对历史和实时运行数据的学习,精准预测进水水质变化趋势,并动态调整药剂投加量、曝气强度、膜清洗周期等关键工艺参数,从而实现从“经验驱动”到“数据驱动”的跨越,最大化系统能效比,最小化资源浪费<sup>[3]</sup>。更进一步,数字孪生技术的应用,使得为物理污水处理厂构建一个虚拟的、实时同步的数字镜像成为可能。这个“数字双胞胎”不仅可以用于日常的工艺模拟和故障预警,还能在实施重大技改前进行方案预演和效果评估,极大地提升了整个系统的可靠性、安全性和管理决策的科学性,标志着工业水处理正稳步迈向高度自动化与智能化的新纪元。

## 3 工业废水深度处理的未来发展趋势

### 3.1 多技术协同集成与定制化解决方案

展望未来,工业废水深度处理系统将彻底告别单一技术堆砌的粗放模式,转向基于系统工程思维的多技术协同集成。这种集成不再是简单的物理串联,而是深度融合“源头分类、过程控制、末端协同”的全链条治理理念。针对制药、印染、电镀、石化等不同行业废水的独特水质指纹,工程师们将为其量身定制从预处理到资源回收的全流程解决方案。例如,面对成分复杂的

高盐高有机废水,一套理想的集成工艺可能首先采用电化学氧化进行预处理,破解大分子有机物的结构;继而通过厌氧膜生物反应器(AnMBR)实现主体有机物的高效降解与沼气回收;再利用正向渗透(FO)或高效反渗透进行低能耗脱盐;最终,残余的浓水进入蒸发结晶单元,实现真正的零液体排放。这种环环相扣、优势互补的集成策略,将是未来应对复杂工业废水挑战的主流范式。

### 3.2 材料科学驱动下的颠覆性技术突破

材料科学无疑是推动工业废水处理技术革新的核心引擎。未来的研发重心将更加聚焦于设计和合成高性能、低成本、环境友好的功能材料。在催化领域,科学家们正致力于开发高活性、高稳定性且易于回收的非均相催化剂,以期在高级氧化和电化学过程中实现效率与成本的最佳平衡。在膜材料方面,“智能响应膜”成为新的研究热点,这类膜能够感知环境变化(如pH值、温度或特定污染物浓度),并自动调节其孔径大小或表面亲疏水性,从而实现自适应的抗污染能力和选择性分离功能<sup>[4]</sup>。而在吸附与离子交换领域,共价有机框架(COFs)、功能化生物炭等新型多孔材料凭借其可设计的孔道结构和丰富的表面官能团,有望实现对特定污染物或有价值资源的高选择性、高容量捕获,为废水的精细化处理与资源化开辟全新路径。

### 3.3 全生命周期低碳化与能源自给

在全球“双碳”战略目标的刚性约束下,对工业废水深度处理工艺的评价标准已从单一的“处理效果”扩展至涵盖全生命周期的“碳足迹”。未来的工艺发展必须将低碳化置于核心位置。这首先体现在大力推广和应用低能耗技术,如正向渗透(FO)、厌氧膜生物反应器(AnMBR)等,并对反渗透等高能耗单元进行精细化的运行参数优化,以最大限度地节能降耗。其次,能源回收将成为工艺设计的内在要求而非附加选项。微生物电化学技术(METs)、厌氧消化等产能技术将被更多地整合到核心处理单元中,目标是使处理厂从一个纯粹的能源消费者转变为能源自给者,甚至成为区域微电网的能源供应节点。最后,绿色化学原则将贯穿始终,努力减少或完全替代有毒有害化学药剂的使用,转而发展环境友好的绿色氧化剂和絮凝剂,从源头上降低工艺的环境负荷。

### 3.4 智慧水务与产业互联网深度融合

随着5G通信、边缘计算和云计算等基础设施的日益完善,智慧水务将迈入与产业互联网深度融合的新阶段。未来的工业废水处理厂将是一个高度自动化、信息化和智能化的“无人工厂”。遍布厂区的传感器网络如同神经末梢,实时采集从进水水质到设备状态的海量数据;强大的数据中台则如同大脑,运用先进的AI算法进行实时分析与智能决策;而执行机构则精准地落实各项指令。通过这种闭环控制,系统能够实现“少人值守、无人操作、最优运行”的理想状态。这种深度融合不仅极大提升了运营效率和安全性,也为水务资产的全生命周期管理、预测性维护以及跨厂区的协同调度提供了坚实的技术支撑,最终将工业水处理推向一个前所未有的高效、透明、智能的新高度。

## 4 结语

工业废水深度处理正处于一个技术快速迭代、理念深刻变革的关键时期。面对日益复杂的水质挑战和“双碳”时代的全新要求,单纯依赖传统技术已难以为继。以高级氧化、膜分离、吸附和生物法为代表的传统工艺,正通过耦合、催化、材料革新等方式焕发新生;而以资源回收、能源自给、智能控制为核心的新一代工艺,则描绘了未来工业水处理的蓝图。未来的发展必须坚持系统性、前瞻性和可持续性原则。一方面,要加强基础研究,特别是在新型功能材料、高效反应机理和智能算法等领域取得原创性突破;另一方面,要推动产学研用深度融合,加速创新技术的工程化和产业化进程。同时,政府应完善相关法规标准和激励政策,引导企业从被动治污转向主动治污与资源化并举。

## [参考文献]

- [1]纪艳灵.工业废水深度处理技术的最新进展与挑战[J].智慧中国,2025,(02):72-73.
- [2]宋姣.污水深度处理技术在工业废水处理中的应用[J].清洗世界,2024,40(11):86-88.
- [3]涂德贵.工业废水深度处理新工艺的研究与应用[J].河南科技,2022,41(09):127-130.
- [4]谢丽敏.工业废水处理技术比选和应用分析[J].中国资源综合利用,2025,43(09):272-274.