

工业废水深度处理与资源化利用工艺优化探析

张素平

山东鸿运工程设计有限公司河北省瑞赢分公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]工业废水作为工业生产过程中的副产物,其排放具有显著的量多、成分复杂和水质波动大的特点。首先,工业废水的排放量通常与工业生产的规模直接相关,尤其是在化工、制药、电镀等行业中,废水排放量极为庞大。这种大规模排放不仅对水环境造成了直接压力,还可能导致区域性水资源短缺问题。其次,工业废水的成分复杂性主要体现在其中含有大量高浓度有机污染物和无机难降解物质,如重金属离子、多环芳烃、氨氮化合物等。这些污染物往往具有毒性高、生物降解性差的特点,进一步加剧了其对生态环境的危害。此外,工业废水的水质波动性也是一大挑战,由于生产工艺的变化或原材料的不同,废水中的污染物浓度和种类可能在短时间内发生显著变化,这对废水处理系统的稳定运行提出了更高的要求。工业废水排放对环境造成的危害是多方面的。一方面,未经有效处理的工业废水直接排入自然水体后,会导致水体富营养化、溶解氧下降等问题,从而破坏水生生态系统的平衡。另一方面,废水中的有毒有害物质可能通过食物链积累,最终对人类健康构成威胁。例如,某些重金属污染物在人体内蓄积后可能引发慢性疾病,甚至致癌。因此,如何有效控制工业废水的排放并实现其深度处理与资源化利用,已成为当前环境保护领域亟待解决的重要课题。

[关键词]工业废水深度处理;资源化利用;工艺优化

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19784

中图分类号: X783.5

文献标识码: A

Exploration on Process Optimization for Advanced Treatment and Resource Utilization of Industrial Wastewater

ZHANG Suping

Hebei Ruiying Branch of Shandong Hongyun Gongcheng Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Industrial wastewater, as a byproduct of industrial production processes, has significant characteristics of large quantity, complex composition, and large water quality fluctuations in its discharge. Firstly, the discharge of industrial wastewater is usually directly related to the scale of industrial production, especially in industries such as chemical, pharmaceutical, and electroplating, where the discharge of wastewater is extremely large. This large-scale discharge not only puts direct pressure on the water environment, but may also lead to regional water resource shortages. Secondly, the complexity of the composition of industrial wastewater is mainly reflected in the presence of a large number of high concentration organic pollutants and inorganic recalcitrant substances, such as heavy metal ions, polycyclic aromatic hydrocarbons, ammonia nitrogen compounds, etc. These pollutants often have high toxicity and poor biodegradability, further exacerbating their harm to the ecological environment. In addition, the fluctuation of industrial wastewater quality is also a major challenge. Due to changes in production processes or differences in raw materials, the concentration and types of pollutants in wastewater may undergo significant changes in a short period of time, which puts higher demands on the stable operation of wastewater treatment systems. The harm caused by industrial wastewater discharge to the environment is multifaceted. On the one hand, untreated industrial wastewater discharged directly into natural water bodies can lead to eutrophication and a decrease in dissolved oxygen, thereby disrupting the balance of aquatic ecosystems. On the other hand, toxic and harmful substances in wastewater may accumulate through the food chain, ultimately posing a threat to human health. For example, the accumulation of certain heavy metal pollutants in the human body may cause chronic diseases and even cancer. Therefore, how to effectively control the discharge of industrial wastewater and achieve its deep treatment and resource utilization has become an important issue that urgently needs to be addressed in the field of environmental protection.

Keywords: advanced treatment of industrial wastewater; resource utilization; process optimization

引言

目前,工业废水的处理主要依赖于物理法、化学法和生物法三大类传统工艺。然而,这些方法在深度处理与资源化利用方面均存在一定局限性。物理法主要包括沉淀、过滤、吸附等工艺,其优点在于操作简单、成本较低,但对于溶解性污染物和胶体物质的去除效果有限。例如,在工业废水中常见的低浓度重金属离子和微污染有机物,仅通过物理法难以达到严格的排放标准。此外,物理法通常作为预处理手段,需与其他工艺结合使用,否则无法实现废水的全面净化。

化学法则通过化学反应实现污染物的转化或分离,常见工艺包括混凝、氧化、还原等。尽管化学法在处理高浓度有机废水和重金属废水方面表现出较高的效率,但其运行成本较高,且可能产生二次污染问题。例如,芬顿氧化技术虽然能够有效降解难降解有机物,但其过程中产生的铁泥需要进一步处理,增加了工艺的复杂性和成本。同时,化学试剂的大量使用也可能导致水体盐分增加,影响后续的资源化利用。

生物法是利用微生物的代谢作用将废水中的有机污染物转化为无害物质的工艺,主要包括活性污泥法、生物膜法等。该方法的优点在于运行成本较低且环境友好,但对于难降解有机物和有毒物质的处理能力有限。此外,生物法对水质条件(如 pH 值、温度)较为敏感,水质波动较大的工业废水往往需要额外的预处理措施以确保系统的稳定运行。因此,传统的生物处理工艺在面对复杂多变的工业废水时,其应用范围受到一定限制。

综上所述,现有工业废水处理工艺在深度处理与资源化利用方面仍存在诸多不足。为了应对日益严格的环保要求和资源化利用需求,亟须开发更加高效、经济且可持续的新型处理工艺。

1 深度处理与资源化利用技术剖析

1.1 膜技术

1.1.1 膜技术原理与类型

膜技术是一种基于物理分离原理的废水处理技术,其核心在于通过选择性透过膜材料实现对水中污染物的高效分离。根据膜孔径大小及分离机制的不同,膜技术可分为微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)和反渗透(RO)等类型。微滤膜通常具有 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 的孔径范围,主要用于去除悬浮颗粒、细菌和胶体物质;超滤膜的孔径一般在 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 之间,能够有效截留大分子有机物和病毒。纳滤膜的特点在于其对二价及以上离子的高选择性截留,

同时允许部分一价离子通过,适用于硬度和有机物含量较高的废水处理。反渗透膜则具有最小的孔径(约 $0.0001\mu\text{m}$),几乎可以完全去除水中的溶解性盐类、有机物和微生物,广泛应用于高纯度水的制备及工业废水深度处理领域。

不同类型膜技术的工作原理存在显著差异。微滤和超滤主要基于筛分效应,即通过膜孔径的大小选择性地截留特定粒径的颗粒物;而纳滤和反渗透则涉及溶解-扩散机理,其中溶质和溶剂在膜材料中的溶解度和扩散速率决定了分离效率。此外,膜技术的操作模式也多样化,包括死端过滤、错流过滤等,这些模式的选择直接影响膜系统的运行稳定性和处理效果。例如,错流过滤通过切向流动减少膜表面污染层的形成,从而提高膜通量和使用寿命。

1.1.2 膜技术应用优势与问题

膜技术在工业废水深度处理中展现出诸多显著优势,成为实现水资源化利用的重要手段之一。首先,膜技术具有高效的分离性能,能够有效去除废水中的悬浮物、胶体、有机物和无机盐等各类污染物,出水水质稳定且满足严格的排放标准。其次,膜技术操作简单,易于实现自动化控制,可显著减少人工干预并提高运行效率。此外,膜技术具有较高的灵活性,能够根据废水水质特点和处理需求进行模块化设计,适应不同规模的工程应用。

然而,膜技术在实际应用中也面临一系列挑战,其中最为突出的是膜污染问题。膜污染主要由悬浮颗粒、胶体物质、微生物及溶解性有机物在膜表面的沉积或堵塞引起,导致膜通量下降和运行成本增加。为缓解膜污染问题,通常需要采取预处理措施(如混凝、沉淀)或定期清洗膜组件,但这无疑增加了系统的复杂性和维护难度。此外,膜技术的高成本和能耗也是限制其广泛应用的关键因素。反渗透膜由于其高选择性和低通量特性,运行过程中需克服较高的渗透压,导致能耗显著增加;而膜材料的制造和更换成本也相对较高,进一步加大了投资负担。因此,在实际工程应用中,需综合考虑膜技术的优势与局限性,结合具体水质条件和处理目标进行合理选择与优化。

1.2 高级氧化技术

1.2.1 高级氧化技术原理与类型

高级氧化技术(Advanced Oxidation Processes, AOPs)是一类基于生成高活性自由基(如 $\text{OH}\cdot$)的废水处理技术,其核心原理是通过强氧化剂或催化作用将难降解有机物转化为易于生物降解的小分子化合物或无机物。根据氧化机制和反应条件的不同,AOPs 可分为芬顿氧化、臭氧氧

化和光催化氧化等多种类型。芬顿氧化技术利用亚铁离子 (Fe^{2+}) 与过氧化氢 (H_2O_2) 之间的反应生成羟基自由基 ($\text{OH}\cdot$), 该自由基具有极高的氧化电位 (2.8V), 能够快速攻击有机物分子并使其矿化。臭氧氧化技术则通过臭氧 (O_3) 的直接氧化作用或其分解产生的 $\text{OH}\cdot$ 间接氧化作用, 实现对废水中有机污染物的有效去除。臭氧氧化具有反应速度快、无二次污染等优点, 尤其适用于处理含有芳香族化合物的工业废水。

光催化氧化技术是一种结合光能与催化剂的先进处理工艺, 其典型代表为二氧化钛 (TiO_2) 光催化体系。在紫外光照射下, TiO_2 表面生成电子-空穴对, 进而诱导生成 $\text{OH}\cdot$ 自由基, 实现对有机物的深度氧化分解。与其他 AOPs 相比, 光催化氧化技术具有环境友好、能耗较低等优势, 但其对光源的依赖性较强, 且催化剂的活性和稳定性仍需进一步提升。此外, 近年来发展起来的电化学氧化技术也是一种重要的 AOPs 形式, 其通过阳极反应生成活性物种 (如 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{ClO}\cdot$ 等) 实现对废水中污染物的氧化降解, 尤其适用于处理高盐分、高毒性的工业废水。

1.2.2 高级氧化技术应用优势与问题

高级氧化技术在工业废水深度处理中展现出显著的优势, 特别是在降解难降解有机物方面表现尤为突出。首先, AOPs 具有较强的氧化能力, 能够高效分解传统生物处理方法难以去除的有机物, 如多环芳烃 (PAHs)、酚类化合物和染料中间体等。其次, AOPs 反应速度快, 通常在几分钟至数小时内即可完成对目标污染物的氧化降解, 显著缩短了处理周期。此外, AOPs 具有较高的适用性, 可根据废水水质特点选择合适的氧化工艺, 并通过调节操作参数 (如氧化剂投加量、反应时间等) 优化处理效果。

然而, 高级氧化技术在实际应用中仍存在一些亟待解决的问题, 其中能耗高和氧化剂消耗量过大是最为显著的挑战。例如, 芬顿氧化技术虽然氧化效率高, 但其对酸性条件 ($\text{pH}3\sim5$) 的依赖性强, 且反应过程中产生的大量铁泥需要进一步处理, 增加了运行成本和二次污染风险。臭氧氧化技术虽然无二次污染问题, 但其臭氧发生器能耗较高, 且臭氧的利用率有限, 导致整体处理成本居高不下。尽管光催化氧化技术在环境友好性方面表现优异, 但其对光源的依赖性限制了其在夜间或低光照条件下的应用效果, 同时催化剂的失活问题也影响了系统的长期稳定性。因此, 在实际工程应用中, 需综合考虑 AOPs 的技术经济性和环境效益, 通过优化工艺参数和开发新型催化剂等手段进一步提升其应用潜力。

2 工艺优化策略

2.1 技术组合优化

膜技术与高级氧化技术、生物处理技术的组合应用在工业废水深度处理中展现出显著的可行性与优势。膜技术以其高效分离特性, 能够有效去除废水中的悬浮物、胶体及部分有机物, 但其对难降解有机物的处理能力有限。而高级氧化技术通过生成强氧化性自由基 (如 $\text{OH}\cdot$), 能够高效分解难降解有机物, 从而弥补膜技术的不足。研究表明, 将膜技术与芬顿氧化或臭氧氧化相结合, 可显著提高废水中 COD 和 TOC 的去除率, 同时延长膜的使用寿命。此外, 生物处理技术通过微生物代谢作用降解有机物, 具有运行成本低、环境友好等优势, 但对其难以生物降解的污染物处理效果欠佳。因此, 采用“生物处理-膜分离-高级氧化”组合工艺, 不仅能够实现对复杂污染物的高效去除, 还能降低单一技术在运行中的局限性, 从而提升整体处理效果。

不同技术组合方式对处理效果的提升具有显著差异。例如, 在某化工企业的工业废水处理项目中, 采用“超滤-反渗透-臭氧氧化”组合工艺, 实现了对高盐废水中有机物和无机盐的高效分离与降解, 出水水质达到回用标准。类似地, 在电镀废水处理中, “生物接触氧化-纳滤-芬顿氧化”组合工艺被证明能够有效去除重金属离子和难降解有机物, 同时实现水资源的高效回收。这些案例表明, 合理选择和优化技术组合方式, 能够充分发挥各项技术的优势, 从而实现工业废水深度处理与资源化利用的目标。

2.2 运行参数优化

各处理工艺的关键运行参数对工业废水深度处理的效果具有重要影响。pH 值是影响高级氧化技术和生物处理技术性能的重要参数之一。在芬顿氧化过程中, 酸性条件 ($\text{pH}2\sim4$) 有利于 Fe^{2+} 催化 H_2O_2 生成 $\text{OH}\cdot$ 自由基, 从而提高氧化效率; 而在生物处理中, 中性至微碱性条件 ($\text{pH}6\sim8$) 更有利于微生物的代谢活性。温度也是影响处理效果的重要因素, 较高的温度能够加快反应速率, 但过高的温度可能导致催化剂失活或膜性能下降。例如, 在臭氧氧化过程中, 适宜的温度范围通常为 $20\sim30^\circ\text{C}$, 而在膜分离过程中, 温度过高可能加速膜的老化。

停留时间同样对处理效果具有显著影响。在生物处理中, 较长的停留时间有助于微生物充分降解有机物, 但过长的停留时间可能导致反应器体积增大, 增加投资成本。在膜分离过程中, 适当的停留时间能够保证废水与膜充分接触, 从而提高分离效率, 但过长的停留时间可能加剧膜

污染。通过实验确定最佳运行参数范围,能够在保证处理效果的同时,降低运行成本并提高资源化利用率。例如,在某电镀废水处理工程中,通过响应面法优化 pH 值、温度和停留时间等参数,实现了对 COD 和重金属离子的高效去除,同时显著降低了药剂消耗和能耗。

2.3 成本效益分析

不同优化工艺的投资成本、运行成本及资源回收效益对其经济可行性具有重要影响。在投资成本方面,膜技术和高级氧化技术通常需要较高的设备投资和安装费用。例如,反渗透膜系统的购置和安装成本较高,但其高效的分离性能能够显著降低后续处理单元的负荷。相比之下,生物处理技术的设备投资相对较低,但其占地面积较大,且在处理难降解污染物时可能需要额外的预处理单元。运行成本主要包括能耗、药剂消耗和人工维护费用。高级氧化技术由于需要消耗氧化剂(如 H_2O_2 和 O_3),其运行成本较高;而膜技术则面临膜污染导致的清洗和更换费用增加的问题。

然而,优化工艺的资源回收效益能够在一定程度上抵消其高昂的投资和运行成本。例如,在某锌冶炼企业的废水处理项目中,采用“预处理-反渗透-电渗析-降膜蒸发结晶”工艺,不仅实现了废水的达标排放,还通过回收水资源和无机盐获得了显著的经济效益。类似地,在化工企业废水处理中,通过“超滤-反渗透-臭氧氧化”组合工艺实现的水资源回用,大幅降低了企业的用水成本,同时减少了污染物排放对环境的影响。因此,综合考虑投资成本、运行成本及资源回收效益,优化工艺在经济可行性方面具有显著优势,为实际工程应用提供了重要参考。

3 实际案例分析

3.1 案例一

某化工企业工业废水深度处理与资源化利用项目以高盐、难降解有机污染物为特征,其废水主要来源于精细化工生产过程中的工艺排水及清洗废水。针对该废水的水质特点,项目采用了“预处理-两级 AO 生化处理-高效沉淀-臭氧接触氧化-生物滤池-V 型滤池-超滤-反渗透-浓水臭氧催化氧化-浓水曝气生物滤池-浓水澄清池-滤布滤池-次氯酸钠消毒”的工艺流程。通过预处理去除悬浮物和部分有机物,两级 AO 生化处理进一步降解可生化有机物,随后利用膜技术实现水和盐的分离,最终通过高级氧化技术处理浓水以达到回用或排放标准。

该工艺的实际运行效果表明,外排水质稳定达到 GB18918-2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的

一级 A 标准,COD、氨氮和总磷的去除率分别达到 95%、98%和 99%以上。此外,反渗透系统产水率可达 65%,浓水经臭氧催化氧化和曝气生物滤池处理后,可实现部分回用,显著提高了水资源利用率。从经济效益来看,尽管初期投资较高,但由于膜技术和高级氧化技术的结合大幅减少了化学药剂的使用量,同时资源化利用带来的经济效益在一定程度上抵消了运行成本,使得项目在经济上具备可行性。

进一步分析发现,该工艺的成功实施得益于多种技术的协同作用。例如,臭氧接触氧化不仅有效去除了难降解有机物,还为后续生物滤池提供了可生化性较高的进水;超滤和反渗透的联合应用确保了出水水质的稳定性,同时降低了膜污染的风险。然而,实际运行中也暴露出一些问题,如反渗透膜的高能耗和浓水处理成本较高等,这些问题仍需通过进一步优化运行参数和技术改进加以解决。

3.2 案例二

某电镀园区工业废水处理工程主要针对电镀生产过程中产生的高浓度重金属废水及含氰废水进行深度处理与资源化利用。该项目设计规模为 15 万 m^3/d ,其中工业废水占比超过 80%,进水水质波动较大且含有多种有毒有害物质。为此,工程采用了以生化处理为核心,辅以多种物化处理的组合工艺,具体流程包括“预氧化+多段 A^2O 生物池+多效澄清池+臭氧氧化+曝气生物滤池+加炭澄清池”。通过预氧化去除氰化物和部分有机物,多段 A^2O 生物池进一步降解有机物并去除氮磷,后续臭氧氧化和曝气生物滤池则用于深度处理以确保出水达标。

实际运行结果表明,该工艺对 COD、重金属离子(如 Cr、Ni、Cu)和氰化物的去除率分别达到 90%、99%和 99.9%以上,出水水质满足 GB21900-2008《电镀污染物排放标准》中的相关要求。此外,通过多效澄清池和加炭澄清池的组合应用,显著提高了污泥的沉降性能和出水清澈度,同时降低了化学药剂的使用量。从环境影响来看,该工艺通过设置事故池和地下水监测井等措施,有效防止了突发事故对周边环境的污染,体现了较强的环境友好性。

然而,该工艺在实际运行中也面临一定挑战。例如,由于进水水质波动较大,生化系统的稳定性受到一定影响,需要频繁调整运行参数以维持处理效果。此外,臭氧氧化和曝气生物滤池的能耗较高,导致运行成本增加,这在一定程度上限制了其大规模推广应用。尽管如此,通过优化技术组合和运行管理,该工艺仍展现出良好的应用前景,为类似电镀园区的废水处理提供了有益借鉴。

4 未来发展趋势

4.1 新型处理技术研发

随着工业废水处理技术的不断发展,新型处理技术的研发已成为实现深度处理与资源化利用的关键方向。在膜技术领域,新型膜材料的研究正逐步成为热点,例如具有高通量、高选择性和抗污染性能的纳米复合膜材料。这类材料通过引入功能性纳米颗粒或改性表面化学性质,能够显著提升膜分离效率并延长使用寿命,从而降低运行成本。此外,正向渗透膜技术作为一种低能耗的分离方法,近年来也受到广泛关注。其利用自然渗透压驱动水分子透过膜,相较于传统反渗透技术可大幅减少能源消耗,在工业废水回用领域展现出良好的应用前景。

在高级氧化技术方面,高效催化剂的开发是推动技术进步的核心。研究人员致力于设计非均相催化剂,以克服传统均相催化剂难以回收和二次污染的问题。例如,基于过渡金属氧化物的催化剂在臭氧氧化和光催化氧化中表现出优异的性能,其能够通过调控晶体结构和表面缺陷位点来增强自由基生成能力,从而提高对难降解有机物的去除效率。同时,生物酶催化氧化技术作为一种绿色可持续的处理方法,也逐渐崭露头角。该技术利用特定微生物分泌的酶类催化氧化污染物,具有反应条件温和、环境友好等优点,为工业废水处理提供了新的思路。

除了单一技术的创新,多种技术的集成与协同作用也成为未来研发的重要方向。例如,将膜技术与高级氧化技术相结合,可以在去除悬浮颗粒和胶体的同时降解溶解性有机物,从而实现更高效的废水净化。此外,通过引入电化学辅助手段,还可以进一步降低能耗并提升处理效果。这些综合性技术的研发不仅能够满足日益严格的环保要求,还能够为工业废水资源化利用提供更加经济可行的解决方案。

4.2 智能化控制应用

智能化控制技术在工业废水处理工艺优化中的应用前景广阔,其通过实时监测、数据分析与自动调节等功能,能够显著提升处理系统的稳定性与效率。首先,传感器技术的快速发展使得对废水水质参数的在线监测成为可能。例如,pH值、溶解氧浓度、化学需氧量(COD)和氨氮含量等关键指标均可通过高精度传感器进行连续监测,并将数据实时传输至中央控制系统。这种即时反馈机制不仅

有助于操作人员及时掌握系统运行状态,还能为工艺参数调整提供科学依据,从而确保处理效果始终处于最佳水平。

其次,人工智能算法在工业废水处理中的应用正逐步深入。机器学习模型可以通过分析历史数据预测废水水质变化趋势,并优化处理工艺参数设置。例如,支持向量机(SVM)和人工神经网络(ANN)等算法已被成功应用于废水处理厂的运行管理中,用于预测污染物去除率及能耗水平。这些智能算法不仅能够提高处理系统的自适应能力,还可以有效降低人为干预带来的误差,进一步提升系统运行的可靠性。

此外,智能化控制系统还可以通过自动化设备实现处理工艺的精准调节。例如,在膜生物反应器(MBR)中,智能控制系统可以根据膜污染程度自动调节曝气量或膜清洗频率,从而延长膜组件的使用寿命并降低维护成本。类似地,在高级氧化系统中,智能控制技术可根据目标污染物浓度动态调整氧化剂投加量和反应时间,以实现最佳处理效果并减少药剂浪费。这种精细化管理模式不仅能够提高处理效率,还能够显著降低运行成本,为工业废水处理厂的可持续发展提供有力支持。

最后,智能化控制技术的应用还有助于实现工业废水处理过程的整体优化。通过建立全流程数字化模型,可以对各个处理单元进行协同调控,从而实现资源的高效利用和能源的最低消耗。例如,在某化工园区废水处理项目中,智能化控制系统通过对不同企业的废水排放特性进行分析,优化了废水混合比例和处理工艺路径,使得整体处理效率提升了20%以上,同时运行成本下降了15%。这一案例充分证明了智能化控制在工业废水处理领域的巨大潜力,也为未来相关技术的推广和应用奠定了坚实基础。

[参考文献]

- [1]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(9):127-130.
- [2]李剑明.工业废水治理技术及其进展研究[J].皮革制作与环保科技,2023,4(15):22-23.
- [3]张园远.工业废水治理工艺运行流程研究[J].中国地名,2023(4):217-219.

作者简介:张素平(1992—),女,汉族,毕业于邢台职业技术学院,现就职于山东鸿运工程设计有限公司河北省瑞赢分公司。