

污水深度处理技术在工业废水处理中的应用研究

潘晓梁

杭州中环环保工程有限公司 浙江杭州 310020

摘要: 随着工业的快速发展,工业废水的产生量日益增加,其成分复杂、污染严重,对生态环境和人类健康构成了巨大威胁。污水深度处理技术作为保障工业废水达标排放、实现水资源循环利用的关键手段,受到广泛关注。本文研究多种污水深度处理技术在工业废水处理中的应用,结合实际案例分析和数据对比,探讨不同技术的优缺点及适用场景,旨在为工业废水处理提供科学、有效的技术选择和应用参考,推动工业可持续发展。

关键词: 污水深度处理技术; 工业废水; 处理

引言

工业在国民经济中占有举足轻重的地位,而在工业生产过程中产生的大量废水已成为重要的环境污染源。据统计,我国每年产生的废水总量已超过200亿吨,日均排放5600万吨,其中包括印染、造纸、化工、医药等工业废水。传统污水处理工艺仅能满足基本排放标准,难以满足日趋严格的环保要求和水资源回收利用要求。因此,开展污水深度处理技术的研究与应用,对减少工业废水带来的环境污染,实现水资源高效利用,具有重要的现实意义。

一、工业废水的特点及危害

1. 工业废水的特点

工业废水成分复杂,浓度高,水质水量波动大。工业废水的组成因行业而异,例如化工废水中可能含有多种有机化合物、重金属离子和酸碱物质;印染废水中含有大量的染料、助剂和表面活性剂;电镀废水中则富含重金属如铬、镍、铜等。以某化工园区为例,其排放的工业废水中有机物浓度是生活污水COD浓度的数倍甚至数十倍。同时,工业生产的周期性和间歇性导致废水水质水量在一天内或不同季节变化较大,给废水处理带来了极大的挑战^[1]。

2. 工业废水的危害

工业废水未经有效处理直接排放,严重危害生态环境与人体健康;从环境角度看,高浓度有机物、氮、磷、磷等污染物可引起水体富营养化、藻类暴发、水体发黑

发臭。重金属是一类难降解的重金属离子,可经食物链富集,对水生生物及土壤微生物产生毒害效应,进而影响生态系统稳定性。对人类健康而言,饮用或接触受污染的水导致各种疾病,如重金属中毒引发的神经系统、泌尿系统疾病,以及有机污染物导致的癌症、内分泌紊乱等。

二、污水深度处理技术概述

污水深度处理是指在常规处理工艺基础上,通过物理、化学或生物等手段对废水中残余污染物进行进一步去除,以达到更高的水质标准。介绍了膜分离、高级氧化法、吸附法和离子交换法等几种常用的污水深度处理方法。这些技术具有各自的特点和适用范围,能够针对不同类型的工业废水污染物进行有效去除^[2]。

三、主要污水深度处理技术在工业废水处理中的应用

1. 膜分离技术

膜分离技术是指通过特定工艺制备的具有选择性渗透特性的膜,在外力的作用下,实现对混合物的分离、纯化和浓缩。根据膜孔径大小可将其划分为:微滤、超滤、纳滤、反渗透。微滤法主要是对粒径在0.1微米以上的颗粒及悬浮物进行过滤;超滤可对1000~1000万Da的大分子物质进行截留;纳滤法可以将小分子有机物以及分子量在200~1000Da范围内的多价离子进行分离;而反渗透技术几乎可以去除水中的各种杂质,包括盐类、微生物、有机物等等。膜分离是一种高效,节能,不会发生相变和操作简便的技术。实现对污染物的高精度分离,出水水质稳定可靠,可满足不同行业对回用水水质的严格要求。缺点:膜组件成本较高,运行过程中易受到污染,需要定期进行清洗和维护,增加了运行成本。此外,膜的使用寿命有限,需要定期更换膜组件^[3]。

作者简介: 潘晓梁(1989—),男,汉族,浙江杭州人,大学本科学历,工程师,研究方向:环保工程技术。

某印染企业采用超滤-反渗透组合工艺处理印染废水。超滤阶段去除水中大分子有机物，胶体及悬浮物，为反渗透工艺提供预处理条件。采用反渗透技术，对水中的小分子有机物、染料、盐等进行了处理，使出水达到回用水的标准。

经过该工艺处理后，印染废水的回用率可达70%以上，化学需氧量（COD）从进水的1500mg/L降至出水的50mg/L以下，色度从进水的500倍降至出水的10倍以下，有效实现了水资源的循环利用和污染物的减排。表1展示该印染废水处理前后的水质对比：

表1 该印染废水处理前后的水质对比

检测项目	进水水质	出水水质	去除率（%）
COD（mg/L）	1500	< 50	> 96.7
色度（倍）	500	10	98
悬浮物（mg/L）	300	< 10	> 96.7
硬度（mg/L）	450	< 50	> 88.9

2. 高级氧化技术

高级氧化是指在水中产生具有强氧化性的·OH等活性物种，实现对废水中有机污染物（如二氧化碳、水等）的氧化降解。芬顿氧化，臭氧氧化，光催化氧化，是一种常用的高级氧化技术。芬顿氧化（Fenton）是一种利用亚铁离子（Fe²⁺）催化过氧化氢生成羟基自由基的新方法。臭氧氧化规律是利用臭氧强烈的氧化作用对有机物质进行直接氧化；光催化氧化技术是利用光催化剂（如氧化钛等）激发光能产生羟基自由基。高级氧化技术能高效降解难降解有机污染物，具有快速、高效、可生化性好等优点。不足之处：以芬顿氧化为代表的高级氧化工艺消耗较大，污泥量大，处理成本高。同时，部分技术（如光催化氧化）对反应条件（如光强、催化剂活性等）的要求较高，限制了其实际应用。

介绍了芬顿-生物联合工艺对制药废水的处理效果。制药废水含有大量难降解有机污染物，常规生化处理工艺很难达到要求。首先，采用芬顿氧化技术对污水进行预处理，使大分子有机污染物被氧化，生成小分子有机污染物，从而改善污水的可生化性。然后再进入生物处理系统进行进一步处理。经过该工艺处理后，制药废水的COD从进水的3000mg/L降至出水的150mg/L以下，去除率达到95%以上。表2为该制药废水处理前后的主要污染物指标变化。

3. 吸附技术

吸附法是一种利用吸附剂表面活性位点吸附去除水中污染物的方法。常用的吸附剂有：活性炭，树脂，分

表2 该制药废水处理前后的主要污染物指标变化

检测项目	进水水质	出水水质	去除率（%）
COD（mg/L）	3000	< 150	> 95
BOD ₅ （mg/L）	800	< 100	> 87.5
氨氮（mg/L）	200	< 15	> 92.5
总磷（mg/L）	50	< 3	> 94

子筛等。活性炭具有巨大的比表面积、丰富的微孔结构，能有效地吸附有机污染物和重金属离子；而树脂则可以利用其功能团的特点对特定污染物进行选择性的吸附；沸石分子筛因其特殊的晶体结构及离子交换性质，在氨氮、重金属等方面具有广泛的应用前景。吸附法具有操作简便、处理效果好等优点。该吸附剂可以回收再利用，从而降低了操作费用。缺点：吸附剂吸附容量有限，吸附饱和后需再生或替换，操作繁琐，且可能造成二次污染。同时，该技术对进水水质有较高的要求，杂质易堵塞吸附剂的孔道，降低吸附效果^[4]。

某电镀企业采用活性炭吸附法处理含重金属的电镀废水。废水经过格栅拦截大颗粒杂质、调节池均化水质水量等预处理后，进入活性炭吸附塔。在吸附塔内，活性炭凭借其丰富的微孔结构和巨大的比表面积，对重金属离子产生吸附作用。经过吸附处理后，电镀废水中铜离子浓度从进水的50mg/L降至出水的0.5mg/L以下，去除率高达99%。镍离子浓度从进水的30mg/L降至出水的0.1mg/L以下，去除率达到99.7%以上，各项重金属指标均达到了国家《电镀污染物排放标准》（GB21900-2008）中规定的排放限值。该企业通过活性炭吸附法，有效降低了废水中重金属含量，避免了重金属对环境的污染，保障了周边水体及土壤的生态安全，同时也为企业自身树立了良好的环保形象，满足了可持续发展的需求。

4. 离子交换技术

离子交换法是一种利用离子交换树脂对同类型废水中的离子进行交换，从而实现对废水中特定离子的去除或回收。离子交换树脂主要有阳离子交换树脂与阴离子交换树脂两种。如用强酸阳离子交换树脂脱除废水中的钙镁离子，达到软化水质的目的；强碱性阴离子交换树脂能有效地去除水中的氯离子和硫酸盐等离子。离子交换法具有选择性高、去除效率高、可回收有价值离子等优势，可实现特定离子的精确去除与资源回收。不足之处在于：离子交换树脂价格昂贵，再生过程中需消耗大量的酸碱等化学剂，且再生废液处理过程复杂，易产生二次污染。另外，树脂的使用寿命也是有限制的，需要经常更换。

某化工企业在生产过程中产生大量含镍废水，为实现废水达标排放及镍资源回收利用，采用离子交换树脂法进行处理。企业选用对镍离子具有高度选择性吸附能力的螯合树脂，构建了离子交换处理系统。废水经初步沉淀、过滤等预处理后，进入离子交换柱。在离子交换柱内，螯合树脂凭借特殊官能团与镍离子发生络合反应，将镍离子牢牢吸附。处理前，废水中镍离子浓度高达150mg/L，经过离子交换树脂处理后，镍离子浓度大幅降至0.05mg/L以下，去除率超过99.9%，远低于《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中规定的镍排放限值1mg/L。不仅如此，吸附饱和后的树脂通过特定洗脱液进行洗脱，回收的镍离子溶液经进一步浓缩、提纯等工艺处理，可回用于企业生产环节，实现了镍资源的循环利用。据估算，该企业每年通过离子交换树脂法回收的镍金属量有效降低，既减少对新镍资源的依赖，降低生产成本，又减轻含镍废水对环境的污染，取得良好的经济效益与环境效益。

四、污水深度处理技术的选择与优化

1. 技术选择依据

在选择污水深度处理技术时，需要综合考虑工业废水的水质特点、处理目标、处理规模、经济成本和环境影响等因素。对含较多难降解有机污染物的污水，应优先采用高级氧化法或与生物法联用；对于对出水水质要求极高、需要实现水资源循环利用的情况，膜分离技术可能更为合适；对于含重金属离子或特定离子的废水，吸附技术和离子交换技术则具有优势。同时，还需要考虑企业的经济实力和运行管理能力，选择成本效益高、易于操作维护的技术。

2. 技术优化策略

为提升污水深度处理技术的效能，降低成本，实现可持续发展，可从以下多方面实施优化策略：其一，多元技术集成。将不同污水深度处理技术有机组合。例如，对于高浓度的有机废水，首先通过高级氧化将其大分子有机物分解成小分子以增强其生物活性，然后通过生物处理工艺对其进行深度降解。在对含有重金属和难降解有机污染物的复杂污水进行预处理时，采用膜分离对重金属和大分子污染物进行截留，后续衔接吸附技术去除残留小分子杂质，实现优势互补，提升整体处理效果；切入，工艺参数精控。结合实验和实际运行数据反馈，精准设定处理工艺参数。在膜分离过程中，精确调控跨膜压差、膜通量，既保证处理效率，又防止膜污染过快。对于生物处理工艺，合理控制溶解氧、污泥浓度与水力

停留时间，确保微生物处于最佳代谢状态，提高污染物去除率。在化学处理工艺里，严格把控药剂投加量、反应温度与pH值，保障反应充分且避免药剂浪费；其三，设备运维升级。构建完备的设备维护体系。定期检查膜组件、吸附塔、反应池等设备，及时发现并修复磨损、堵塞问题。根据不同的污物类型，选用适当的清洗剂和清洗次数，以达到延长涂膜寿命的目的^[5]。

对于吸附剂，开发高效再生技术，恢复其吸附性能，降低运行成本。同时，利用智能化监测设备，实时掌握设备运行状态，提前预警故障，保障处理系统稳定运行；其四，技术创新驱动。加大科研投入，研发新型处理材料与工艺。研发高吸附容量、高选择性的吸附剂，提升吸附技术处理效率。探索新型膜材料，增强膜的抗污染能力与通量。借助人工智能、大数据技术，优化处理工艺控制，实现自动化、智能化运行。通过持续创新，推动污水深度处理技术向高效、低耗、智能方向发展，为污水处理行业提供更优质解决方案。

结论

污水深度处理可以高效地脱除水中多种污染物，达到达标排放，并可回收利用水源，是一项十分重要的研究课题。各种污水深度处理方法都有其优缺点，在工程实践中应针对其特点选用适当的工艺，并对其进行优化，使其具有较好的运行稳定性。在环保需求日益增加、工艺水平不断提升的背景下，污水深度处理技术的革新与发展，为实现工业废水的高效、经济和环境友好的治理提供新的思路。未来，应进一步加强对污水深度处理技术的研究和应用推广，加大技术创新投入，培养专业技术人才，推动工业废水处理行业的健康发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王琦. 污水深度处理技术在工业废水处理中的应用[J]. 城镇建设, 2025(6): 344-346.
- [3] 余水平, 王元月, 何友文, 等. 高级氧化技术在工业废水深度处理中的应用进展[J]. 江西化工, 2023, 39(3): 7-12.
- [4] 傅利, 郝家福, 安莹, 等. 工业园区废水深度处理技术研究现状[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 149-155.
- [5] 梁月清. 某工业园区废水的三维荧光光谱表征及深度处理技术研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2022.