

浅谈工业废水处理中高效且低成本的污染物去除技术

吴春蕾¹ 王妙婷² 张琪³

1. 身份证号码: 1202241990****6221

2. 身份证号码: 1301331992****302X

3. 身份证号码: 1306291989****0544

摘要: 工业废水处理是环境保护和资源可持续利用的重要环节。论文系统阐述了工业废水的特征和危害,探讨了常见的工业废水处理技术,包括生物处理技术、物理处理技术和化学处理技术,并在此基础上重点探讨了几种高效、低成本的污染物去除技术,如吸附技术、光催化技术、膜分离技术以及凝聚—絮凝技术。这些技术在提高污水处理效率、降低处理成本方面表现出了广阔的应用前景。论文旨在为工业废水处理提供理论支持和技术参考,以促进污染物去除技术的进一步发展与应用。

关键词: 工业废水; 污染物去除; 吸附技术; 光催化技术

A Brief Discussion on Efficient and Low Cost Pollutant Removal Technologies in Industrial Wastewater Treatment

Wu Chunlei¹ Wang Miaoting² Zhang Qi³

1. ID No.: 1202241990****6221

2. ID No.: 1301331992****302X

3. ID No.: 1306291989****0544

Abstract: Industrial wastewater treatment is an important link in environmental protection and sustainable resource utilization. This paper systematically elaborates on the characteristics and hazards of industrial wastewater, explores common industrial wastewater treatment technologies, including biological treatment technology, physical treatment technology, and chemical treatment technology, and focuses on several efficient and low-cost pollutant removal technologies, such as adsorption technology, photocatalytic technology, membrane separation technology, and coagulation flocculation technology. These technologies have shown broad application prospects in improving sewage treatment efficiency and reducing treatment costs. This paper aims to provide theoretical support and technical reference for industrial wastewater treatment, in order to promote the further development and application of pollutant removal technology.

Keywords: Industrial wastewater; Pollutant removal; Adsorption technology; Photocatalytic technology

0 前言

随着工业化进程的不断加速和工业生产规模的持续扩大,工业废水排放量急剧增加,其中含有大量有毒有害物质,如重金属离子、有机污染物、油类物质等,这些物质若未经处理直接排放,将对水体环境造成严重污染,危及生态系统稳定和人类健康。工业废水处理已经成为当今环境保护领域亟待解决的重要问题。然而,传统的工业废水处理技术往往存在效率低下、成本高昂、二次污染严重等问题,难以满足日益严格的环保要求和可持续发展需求。因此,探索开发高效、低成本、环境友好的工业废水处理技术,对于减轻环境污染、促进资源循环利用、实现经济与环境的协调发展具有重要意义。

1 工业废水的特征与危害

工业废水是工业生产的副产物,具有三大特征。首先,

成分复杂多样,不同行业废水污染物差异大,如造纸业含纤维素和木质素,电镀业含重金属离子,石化业含油类和芳香族化合物。其次,污染物浓度高,常超标限值数十倍,增加处理难度。最后,毒性强,含有致癌、致畸、致突变物质,威胁生物健康。

未经处理的工业废水排放会导致水体富营养化,破坏生态平衡;重金属通过食物链富集危害生态系统;悬浮物和油类使水体浑浊,降低自净能力。对人类而言,可引发皮肤病、消化道疾病和癌症等健康问题,并影响农业生产和食品安全。因此,开发高效低成本处理技术对环保和可持续发展至关重要。

2 常见工业废水处理技术概述

物理处理技术利用物理作用分离污染物,如筛滤、沉淀、气浮和吸附等。操作简单但主要适用于悬浮物和油类去除,

对溶解性污染物效果有限。沉淀法利用重力分离悬浮颗粒；气浮法则用气泡使轻质悬浮物浮于水面。

化学处理技术通过化学反应改变污染物性质。常见方法包括中和（调节 pH 值）、氧化还原（分解有毒物质）和凝聚絮凝（聚集微小颗粒）。此类技术处理效果好，但成本高且可能引入新的化学物质。

生物处理技术利用微生物代谢降解有机污染物，分为好氧（如活性污泥法）、厌氧和兼性处理。成本低、能耗小，但对水质波动敏感，启动周期长，需专业维护。活性污泥法在好氧条件下培养高浓度微生物降解有机物。

3 高效低成本吸附技术在工业废水处理中的应用

吸附技术是一种利用吸附剂表面对废水中溶解性污染物的选择性富集作用进行废水处理方法，具有操作简单、处理效率高、适用范围广等优点，被广泛应用于工业废水处理领域。传统吸附剂主要包括活性炭、活性氧化铝、硅藻土等材料，其中活性炭因具有发达的孔隙结构和巨大的比表面积（通常达到 $500\sim 1500\text{m}^2/\text{g}$ ），被视为最有效的吸附剂之一。然而，商业活性炭价格昂贵，且再生成本高，限制了其在大规模工业废水处理中的应用。为降低吸附处理成本，近年来研究者们致力于开发各种低成本吸附材料，如农业废弃物（秸秆、果壳、锯末等）、工业副产品（粉煤灰、赤泥、炉渣等）、天然矿物质（沸石、膨润土、凹凸棒石等）以及生物质材料（甲壳素、海藻等）。

农业废弃物基吸附剂因其来源广泛、成本低廉、可再生性强等特点，受到广泛关注。经简单物理或化学改性后，农业废弃物可展现出优异的吸附性能。例如，研究表明，经磷酸活化的玉米芯可用于处理含铬废水，最大吸附容量可达 76.3mg/g ，远高于未改性材料；柚子皮经柠檬酸改性后，对 Cu^{2+} 的吸附容量可提高至 29.8mg/g ，且吸附过程受 pH 值波动影响明显。这类吸附剂不仅实现了农业废弃物的资源化利用，还大幅降低了废水处理成本，经济效益和环境效益显著。

工业副产品作为吸附剂的应用，也是降低处理成本的有效途径。粉煤灰是火电厂燃煤后的主要固体废弃物，主要成分为二氧化硅和氧化铝，具有良好的吸附性能。研究发现，经盐酸活化的粉煤灰对废水中的染料分子具有显著吸附效果，去除率可达 90% 以上。赤泥是铝工业生产过程中产生的碱性废弃物，经酸化处理后可用于重金属吸附，其对 Pb^{2+} 的最大吸附容量可达 132.5mg/g ，成本仅为商业活性炭的 1/10 左右。

纳米材料和新型复合吸附剂的开发，为实现高效低成本的废水处理提供了新思路。纳米铁颗粒、磁性纳米复合材料等具有比表面积大、反应活性高、易于磁分离等优点，在重金属和有机污染物去除方面展现出优异性能。例如， Fe_3O_4 /活性炭复合材料不仅继承了活性炭的大比表面积和丰

富孔隙结构，还具备磁性分离特性，可通过外加磁场快速分离吸附饱和材料，简化了后处理流程，降低了运行成本。此外，氧化石墨烯、碳纳米管等新型碳材料因其独特的层状结构和 $\pi-\pi$ 共轭作用，对芳香族有机污染物表现出优异的吸附性能，被视为下一代高效吸附材料的重要发展方向。

为进一步提高吸附技术的应用效益，可采取多种优化措施。首先，通过化学改性（如酸/碱处理、表面接枝、金属负载等）增强吸附剂对特定污染物的选择性和亲和力。其次，开发连续流动吸附系统，如固定床吸附柱、流化床等，提高处理效率和吸附剂利用率。再次，研究吸附剂再生和循环利用技术，如热再生、化学再生、微波再生等，延长吸附剂使用寿命，降低运行成本。最后，将吸附技术与其他处理方法（如生物处理、膜分离等）联用，形成协同处理体系，克服单一技术的局限性，实现更高效的污染物去除。总体而言，吸附技术作为一种高效、经济、灵活的工业废水处理方法，通过材料创新和工艺优化，在实现低成本高效污染物去除方面展现出广阔的应用前景，如图 1 所示。

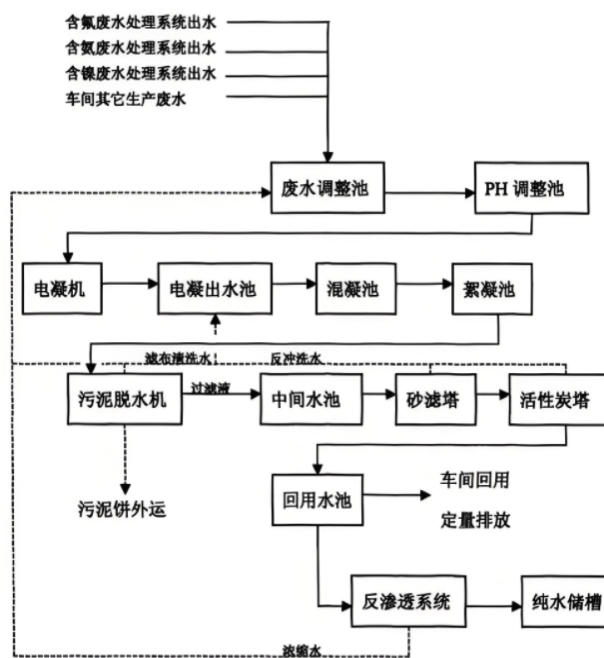


图 1 废水排放

4 光催化技术在难降解有机物处理中的应用与优化

光催化技术是一种基于半导体光催化剂在光照条件下产生电子-空穴对，进而引发一系列氧化还原反应，降解废水中有机污染物的高级氧化技术。该技术以其反应条件温和、氧化能力强、可实现污染物完全矿化等优点，在处理难降解有机物（如染料、农药、抗生素、内分泌干扰物等）方面展现出独特优势。二氧化钛（ TiO_2 ）因其化学稳定性好、催化活性高、无毒无害、成本低廉等特点，成为应用最广

泛的光催化剂。在紫外光照射下, TiO_2 被激发产生强氧化性的羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$), 氧化电位高达 2.8V, 能够非选择性地氧化分解各类有机物, 最终转化为 CO_2 、 H_2O 和无机离子。

然而, 传统光催化技术存在光利用效率低、催化剂难以回收、处理效率受限等问题。为提高光催化效率、降低处理成本, 研究者们进行了多方面创新。首先, 通过元素掺杂 (如 N、S、Fe、Cu 等)、贵金属负载 (如 Pt、Ag、Au 等)、半导体复合 (如 TiO_2/ZnO 、 TiO_2/WO_3 等) 等方法, 拓展 TiO_2 对可见光的响应范围, 提高光能利用效率。研究表明, N 掺杂 TiO_2 在可见光下对甲基橙的降解率可达 85%, 远高于纯 TiO_2 的 20%; Ag 负载 TiO_2 对四环素的光催化降解速率提高了 3.2 倍, 且在循环使用 5 次后仍保持良好活性。

其次, 开发新型光催化材料体系, 如石墨烯基复合光催化剂、铋基光催化剂、硫化物光催化剂等, 进一步拓展光催化技术的应用范围。例如, TiO_2 /石墨烯复合物利用石墨烯优异的电子传输性能, 有效抑制了电子—空穴对复合, 使光催化活性提高 2~3 倍; Bi_2WO_6 、 BiVO_4 等铋基光催化剂具有较窄的带隙 (约 2.8eV), 在可见光区表现出良好的光响应性, 对有机染料的降解效率明显高于传统 TiO_2 。

最后, 优化反应器设计和工艺参数, 提高处理效率, 降低能耗。旋转式光催化反应器通过提高催化剂与污染物的接触面积, 使处理效率提高 30% 以上; 太阳能光催化反应器利用自然光源, 大幅降低了能源消耗, 经济性显著提升。此外, 优化 pH 值、催化剂用量、光强度、反应时间等工艺参数, 可进一步提高处理效果。研究发现, 在弱酸性条件 (pH=4~5) 下, TiO_2 对酚类化合物的光催化降解速率最高; 适当增加气液比, 强化溶解氧传质, 也可显著提高降解效率。

将光催化技术与其他处理方法联用, 形成协同处理体系, 是提高处理效率、拓展应用范围的有效途径。光催化—生物法联用工艺中, 光催化预处理可提高难降解有机物的生物可降解性, 降低生物毒性, 为后续生物处理创造有利条件; 光催化—超声波协同技术利用超声空化效应增强质量传

递和羟基自由基产生, 处理效率提高 40% 以上; 光催化—臭氧联用系统则通过光催化分解臭氧生成更多羟基自由基, 氧化能力进一步增强。

面向实际应用, 固定化光催化技术的开发是解决催化剂回收难题的关键。通过将纳米光催化剂负载在陶瓷、玻璃纤维、活性炭等载体上, 既保持了催化剂的高活性, 又实现了催化剂的固定化, 便于后续分离回收。研究表明, TiO_2 负载玻璃纤维膜在连续流动系统中处理印染废水, COD 去除率可达 85% 以上, 且连续运行 30 天后仍保持稳定的处理效果。

5 结语

随着环保要求日益严格, 高效低成本的工业废水处理技术发展势在必行。论文探讨的吸附技术、光催化技术、膜分离技术和凝聚—絮凝技术各具特色, 通过材料创新、工艺优化和技术集成, 均展现出良好的应用前景。未来, 这些技术将在提高处理效率、降低运行成本、实现资源化利用等方面发挥更大作用, 为工业废水处理提供强有力的技术支撑, 促进生态环境保护和经济社会可持续发展。

参考文献:

- [1] 孙桂强, 王克垒. 厌氧生物技术在工业废水处理中的应用分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(9): 26-28.
- [2] 章淼淼. 工业废水处理方法研究及技术进展探析[J]. 化工管理, 2019(12): 52-53.
- [3] 肖晔林. 浅析化学工业废水处理的技术和管理问题[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(12): 97-98.
- [4] 曲国章. 生物吸附膜技术还原制革工业废水中铬的回收[J]. 皮革制作与环保科技, 2020, 1(4): 86-88+91.
- [5] 黎文辉, 黄建光, 陈彩霞. 贵金属负载型 TiO_2 光催化法处理含酚工业废水研究[J]. 化学工程师, 2024, 38(2): 34-37.

作者简介: 吴春蕾 (1990-), 女, 中国天津人, 硕士, 中级工程师, 从事工业废水的运营工作, 生化、膜技术及高级氧化研究。