

工业废水常见污染物处理技术的对比分析

姜雪松

滨州市思源建设投资发展有限公司，山东滨州，256800；

摘要：工业废水排放引发的水体污染问题已成为制约生态环境可持续发展的关键因素，其所含污染物种类繁多、毒性各异，对处理技术的针对性和高效性提出了严格要求。本文系统梳理了物理处理技术、化学处理技术、生物处理技术及高级氧化处理技术四类工业废水常见处理技术，从技术原理、适用范围、处理效果、运行成本、环境影响等核心维度展开对比分析。研究表明，单一处理技术难以满足复杂工业废水的净化需求，不同技术的优化组合与集成应用是提升处理效率、降低成本的关键方向。通过对各类技术的优劣势剖析，为工业废水处理工艺的科学选择与工程应用提供理论参考，助力推动水污染控制技术的升级与绿色发展。

关键词：工业废水；污染物处理；技术对比；分析

DOI：10.69979/3029-2727.26.02.026

引言

随着工业生产规模的持续扩张，工业废水排放量逐年递增，其中含有的重金属、有机物、悬浮物等污染物严重威胁水体生态系统和人类健康。目前工业废水处理技术呈现多元化发展态势，但不同技术在处理效能、适用场景及经济成本等方面存在显著差异。因此，系统对比分析各类常见处理技术的核心特性，明确其应用边界与优化方向，对提高工业废水处理效率、降低治理成本具有重要现实意义，可为相关工程设计与技术选型提供科学依据。

1 工业废水常见污染物类型及污染特性

1.1 无机污染物

工业废水中的无机污染物主要包括重金属离子、酸碱物质、氮磷化合物及各类无机盐等。重金属离子常见的有汞、镉、铅、铬等，具有毒性强、难降解、易生物富集的特性，长期积累会对生态系统和人体健康造成不可逆危害，尤其会损害神经系统和造血功能；酸碱物质会大幅改变水体 pH 值，破坏水体原有酸碱平衡，严重影响水生生物生存环境，还会腐蚀水利设施；氮磷化合物过量排放易引发水体富营养化，导致藻类大量繁殖形成水华或赤潮，造成水体缺氧恶化，威胁水生生物生存。

1.2 有机污染物

有机污染物是工业废水的主要污染成分之一，涵盖酚类、烃类、酯类、染料、农药等多种物质。这类污染物化学性质复杂，部分具有强毒性、致癌性和致畸性，且降解难度较大，在自然环境中残留时间长。有机污染

物在水体中积累会持续消耗水中溶解氧，导致水体溶解氧含量降至临界值以下，引发水体发黑发臭，同时还可能通过食物链逐级传递放大，对人体健康构成严重威胁，影响呼吸系统、消化系统等多个器官功能。

1.3 悬浮物及其他污染物

工业废水中的悬浮物主要包括泥沙、粉尘、纤维、胶体颗粒等，其存在会使水体浊度显著升高，直接影响水体透光性，阻碍水生植物光合作用，进而破坏水体生态系统的物质循环和能量流动。此外，部分工业废水中还含有放射性物质、病原体等特殊污染物，放射性物质会产生电离辐射危害生物细胞，病原体则易引发传染病传播，这类污染物具有独特的污染特性，对处理技术的针对性要求更高，处理不当会引发严重的环境风险和公共卫生问题。

2 工业废水常见处理技术及原理

2.1 物理处理技术

物理处理技术是基于污染物与水的物理性质差异实现分离净化的方法，主要包括沉淀、过滤、离心分离、吸附等。沉淀技术利用污染物的重力作用，使悬浮颗粒在水中自然沉降或絮凝沉降分离，分为静置沉淀和混凝沉淀；过滤技术通过石英砂、活性炭等滤料截留水中的悬浮物和胶体物质，根据滤料类型可分为深层过滤和表面过滤；离心分离技术借助离心力的作用，实现不同密度污染物的快速分离，处理效率远高于重力分离；吸附技术利用吸附剂的多孔结构和表面活性，吸附水中的污染物分子，常用吸附剂有活性炭、沸石等。该类技术操

作简单、成本较低,且不会产生二次污染,主要用于预处理阶段去除水中的悬浮物和部分溶解性污染物,为后续深度处理降低负荷。

2.2 化学处理技术

化学处理技术通过化学反应改变污染物的化学性质,使其转化为无害或易分离的物质,主要包括中和、混凝、氧化还原、化学沉淀等。中和技术通过加入酸碱试剂调节废水 pH 值至中性,使酸碱污染物转化为盐和水,适用于处理酸碱浓度较高的工业废水;混凝技术利用混凝剂的吸附、架桥作用,使细小悬浮颗粒和胶体物质聚集成大絮体,便于后续通过沉淀或过滤分离,常用混凝剂有聚合氯化铝、硫酸亚铁等;氧化还原技术通过氧化还原反应破坏污染物的化学结构,使其降解为无害物质,根据反应类型可分为氧化法和还原法;化学沉淀技术通过加入沉淀剂,使废水中的污染物形成难溶性沉淀物,实现固液分离,常用于重金属废水处理。该类技术处理效率高、针对性强,适用于处理高浓度、难降解的污染物,可单独使用或与其他技术联用。

2.3 生物处理技术

生物处理技术利用微生物的代谢作用分解转化废水中的污染物,主要包括好氧生物处理、厌氧生物处理和兼氧生物处理。好氧生物处理在有氧条件下,利用好氧微生物将有机污染物分解为二氧化碳和水,常见工艺有活性污泥法、生物膜法等;厌氧生物处理在无氧环境中,通过厌氧微生物的代谢作用将有机污染物转化为甲烷、二氧化碳等物质,甲烷可作为清洁能源回收利用;兼氧生物处理结合了好氧和厌氧生物处理的特点,在不同溶解氧条件下实现污染物的分级降解,适用于处理成分复杂的工业废水。该类技术具有成本低、环境友好、无二次污染等优势,是处理有机废水的主流技术,广泛应用于食品、制药等行业废水处理。

2.4 高级氧化处理技术

高级氧化处理技术是通过产生具有强氧化性的羟基自由基等活性物质,快速氧化分解废水中的难降解污染物,主要包括芬顿氧化、臭氧氧化、光催化氧化、电化学氧化等。芬顿氧化技术利用亚铁离子与过氧化氢反应生成羟基自由基,实现污染物的氧化降解,反应条件温和且操作简便;臭氧氧化技术借助臭氧的强氧化性破坏污染物的化学结构,降解效率高且无二次污染残留;光催化氧化技术在光照条件下,通过二氧化钛等光催化

剂产生自由基氧化分解污染物,适用于低浓度难降解废水处理;电化学氧化技术利用电极反应产生强氧化性物质,实现污染物的降解,处理过程易控制且占地面积小。该类技术处理效率高、降解彻底,适用于处理传统技术难以降解的高浓度有机废水,是当前工业废水深度处理的重要技术方向。

3 工业废水常见处理技术对比分析

3.1 处理效果对比

物理处理技术对悬浮物、胶体等污染物的去除效果显著,去除率可达 80%以上,但对溶解性污染物的处理效果有限,尤其是难以去除水中的重金属离子和难降解有机物。化学处理技术对高浓度污染物的去除效率较高,如化学沉淀法对重金属离子的去除率可达 90%以上,混凝技术对悬浮物和胶体的去除率能达到 85%以上,但对低浓度污染物的处理效果不佳,且可能残留化学药剂。生物处理技术对有机污染物的去除效果显著,好氧生物处理技术对 BOD₅ 的去除率可达 80%-90%,厌氧生物处理技术对高浓度有机废水的 COD 去除率能达到 70%-80%,但对重金属离子等无机污染物几乎无去除效果,且受水质、水温等因素影响较大。高级氧化处理技术对难降解有机污染物的去除效果突出, COD 去除率可达 75%-95%,且能有效分解污染物为无害物质,但对悬浮物的去除效果有限,需与其他技术配合使用。

3.2 适用范围对比

物理处理技术适用于废水预处理或深度处理,尤其适用于处理含大量悬浮物、胶体的废水,如造纸废水、印染废水预处理等,但不适用于处理溶解性污染物含量高的废水。化学处理技术适用于处理高浓度、难降解的工业废水,如电镀废水、化工废水等,对酸碱废水、重金属废水的处理具有独特优势,但不适用于处理低浓度、易生物降解的废水。生物处理技术适用于处理有机污染物含量高、可生物降解性好的废水,如食品加工废水、生活污水、制药废水等,但对有毒有害、难生物降解的污染物处理效果较差,且要求废水水质波动较小。高级氧化处理技术适用于处理难降解、有毒有害的工业废水,如染料废水、农药废水、化工废水等,尤其适用于传统技术处理效果不佳的废水深度处理,但处理成本较高,限制了其在大规模废水处理中的应用。

3.3 运行成本对比

物理处理技术的运行成本较低,主要包括设备能耗、

滤料更换、设备维护等费用,吨水运行成本通常在0.5-2元之间,其中沉淀、过滤技术的成本最低,离心分离技术因能耗较高,成本相对略高。化学处理技术的运行成本主要取决于化学药剂的消耗量,吨水运行成本在1-5元之间,其中中和、混凝技术成本较低,化学沉淀技术因沉淀剂价格较高,成本相对较高。生物处理技术的运行成本较低,吨水运行成本约为0.3-3元,主要包括曝气能耗、污泥处理、微生物培养等费用,其中厌氧生物处理技术因无需曝气,能耗更低,成本优势更为明显。高级氧化处理技术的运行成本较高,吨水运行成本在3-10元之间,其中芬顿氧化、臭氧氧化技术因药剂消耗量大,成本较高,光催化氧化、电化学氧化技术因能耗高,成本也相对较高。

3.4 环境影响对比

物理处理技术不产生化学变化,不会生成新的污染物,且污泥产生量较少,对环境的负面影响较小,是一种环境友好型处理技术。但部分物理处理技术如吸附技术,吸附剂饱和后需要再生或处置,若处理不当可能造成二次污染。化学处理技术在处理过程中会产生一定量的化学污泥,污泥中可能含有重金属离子、化学药剂等有害物质,若处置不当会引发二次污染;同时,部分化学药剂可能残留于处理后的水中,对水体生态环境造成潜在影响。生物处理技术以微生物代谢为核心,处理过程中产生的污泥量较少,且污泥可资源化利用,对环境的影响较小。但生物处理过程中可能会产生少量异味气体,若处理设施密封不当,会影响周边空气质量;此外,微生物对水质、水温等环境条件敏感,处理效果波动可能导致出水水质不达标。高级氧化处理技术在降解污染物的过程中,通常将污染物分解为二氧化碳、水等无害物质,无二次污染产生,且处理后的水质较好。但部分高级氧化技术如臭氧氧化,会产生少量臭氧尾气,若直接排放会对大气环境造成一定影响;同时,电化学氧化等技术可能会产生少量污泥,需进行妥善处置。

4 工业废水处理技术的选择原则与发展趋势

4.1 技术选择原则

工业废水处理技术的选择需遵循针对性、经济性、环保性和可行性原则。针对性原则要求根据废水中污染物的类型、浓度、性质等因素,选择最适合的处理技术,确保处理效果达标;经济性原则要求综合考虑处理技术

的投资成本、运行成本和维护成本,选择性价比最高的处理方案;环保性原则要求选择对环境负面影响小、无二次污染或二次污染易控制的处理技术;可行性原则要求结合企业的实际生产情况、场地条件、技术水平等因素,选择易于实施和操作的处理技术。

4.2 技术发展趋势

未来工业废水处理技术将朝着高效化、低成本、绿色化和集成化的方向发展。高效化方面,将研发具有更高处理效率的新型药剂、催化剂和微生物菌株,提升对难降解污染物的去除能力;低成本方面,将通过技术创新和工艺优化,降低处理技术的投资成本和运行成本,提高技术的经济性;绿色化方面,将开发环境友好型处理技术,减少化学药剂的使用和污泥的产生,实现废水处理与资源回收的有机结合;集成化方面,将推动不同处理技术的优化组合,如物理-化学-生物联用技术、高级氧化-生物联用技术等,充分发挥各类技术的优势,实现复杂工业废水的深度处理。

5 结论

工业废水处理技术的选择需综合考虑污染物类型、处理效果、适用范围、运行成本 and 环境影响等多方面因素。物理处理技术操作简单、成本较低,适用于预处理阶段;化学处理技术针对性强、处理效率高,适用于高浓度污染物处理;生物处理技术环境友好、成本低廉,是有机废水处理的主流技术;高级氧化处理技术降解能力强,适用于难降解污染物处理。单一处理技术难以满足复杂工业废水的处理需求,集成化联用技术是未来工业废水处理的发展方向。通过科学选择和优化组合处理技术,可实现工业废水的高效净化,为生态环境保护和可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 胡嘉敏,包一翔,吴敏. 矿井水中有机污染物控制技术进展[J]. 工业水处理, 2025, 45(10): 1-9.
- [2] 凌敏,夏美琼,许超. 工业废水处理技术研究综述[J]. 环境与发展, 2023, 35(4): 71-81.
- [3] 李敏,付丽亚,谭煜. 臭氧催化氧化在工业废水处理中的应用进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 56-65.
- [4] 孙光溪,田哲,丁然. 典型行业高浓度难降解工业废水深度处理技术研究进展[J]. 环境工程, 2021, 39(11): 16-27.