

环境工程中废水处理技术优化与应用研究

冯南齐

(广东省深圳市光大环保(中国)有限公司, 广东 深圳 518040)

摘要: 废水处理技术是环境工程领域的核心组成部分, 对保障水资源循环利用、维护生态环境稳定具有重要地位。随着各类废水成分日趋复杂及环保要求不断提高, 现有处理技术的适配性与高效性仍有提升空间, 优化废水处理技术并拓展其应用场景成为行业发展的关键方向。本文以物理、化学、生物三类基础处理技术为核心, 系统分析各类技术的特点与应用现状, 深入探讨技术优化策略、组合应用模式及场景适配性, 构建科学的优化效果评估体系。研究旨在为废水处理技术的升级迭代提供理论支撑, 推动技术与实际应用的深度融合, 助力实现水资源高效利用与生态环境协同发展的目标。

关键词: 环境工程; 废水处理; 技术优化

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 3106-2547 (2025) 10-0021-12

DOI: 10.62022/FHR.issn3106-2547.2025.10.003

Research on Optimization and Application of Wastewater Treatment Technology in Environmental Engineering

Nanqi Feng

(Guangdong Shenzhen Guangda Environmental Protection (China) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518040)

Abstract: Wastewater treatment technology is a core component of the field of environmental engineering, and plays an important role in ensuring the recycling of water resources and maintaining ecological stability. With the increasing complexity of various wastewater components and the continuous improvement of environmental protection requirements, there is still room for improvement in the adaptability and efficiency of existing treatment technologies. Optimizing wastewater treatment technologies and expanding their application scenarios have become key directions for industry development. This article focuses on three types of basic processing technologies: physics, chemistry, and biology. It systematically analyzes the characteristics and application status of each technology, explores in-depth technology optimization strategies, combination application modes, and scenario adaptability, and constructs a scientific optimization effect evaluation system. The research aims to provide theoretical support for the upgrading and iteration of wastewater treatment technology, promote the deep integration of technology and practical applications, and help achieve the goal of efficient utilization of water resources and coordinated development of ecological environment.

Keywords: environmental engineering; wastewater treatment; technology optimization

一、废水处理技术的分类与特点

(一) 物理处理技术: 沉淀、过滤、气浮等原理及应用场景

物理处理技术是废水处理流程中的基础环节, 其核心原理是通过物理作用分离废水中的悬浮颗粒、胶体物质及部分溶解性物质, 在处理过程中不改变污染物的化学性质, 具有操作简单、能耗较低、无二次污染、处理周期短等特点。这类技术广泛应用于各类废水的预处理阶段, 可有效去除废水中的大部分悬浮杂质, 降低后续处理工序的负荷, 部分工艺经过优化后还可作为深度处理的辅助手段, 进一步提升出水水质, 为后续处理工序降低负荷、提升效果,

在整个废水处理系统中发挥着基础性保障作用。

沉淀技术依靠重力作用使废水中密度大于水的悬浮颗粒沉降分离, 是物理处理技术中应用最广泛、最成熟的工艺之一。根据水流状态可分为平流式沉淀、竖流式沉淀、辐流式沉淀等多种类型, 不同类型的沉淀工艺适配不同的处理场景与水量需求。平流式沉淀池具有构造简单、操作稳定、处理量大等优势, 适用于处理含有大量泥沙、悬浮物的废水, 如工业生产中的冷却废水、矿山废水、生活污水的初处理阶段, 其沉淀效果受水流速度、停留时间等参数影响较大, 通常需控制水流速度在10mm/s ~ 20mm/s, 停留时间在1.5h ~ 3h。过滤技术通过过滤介质截留废水中的杂

作者简介: 冯南齐, 硕士, 工程师, 研究方向为废水处理技术优化与环保设备研发。

质,过滤介质的种类、孔径大小直接决定过滤效果,常见的过滤介质可分为石英砂、活性炭、滤膜、陶粒等。其中石英砂过滤常用于预处理去除大颗粒杂质,过滤精度一般在 $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$,可有效去除粒径大于过滤介质孔径的悬浮颗粒;活性炭过滤凭借其发达的孔隙结构,不仅能截留微小颗粒,还可吸附部分有机物、异味及色度物质,适用于生活污水深度处理及饮用水预处理;膜过滤则分为超滤、纳滤等,超滤膜孔径在 $0.01\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$,可去除微小颗粒、胶体及部分细菌,能截留溶解性盐类及小分子有机物,适用于深度处理中去除微小颗粒与胶体,实现中水回用。气浮技术通过向废水中通入溶气水,产生直径在 $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 的微小气泡,气泡与废水中的悬浮颗粒、胶体物质充分接触并吸附,使颗粒随气泡上浮至水面形成浮渣,再通过刮渣设备去除,适用于处理颗粒密度接近或小于水的废水,如含油废水、印染废水、造纸废水等,能有效去除废水中的乳化油、纤维、色素等杂质。气浮技术的处理效果与气泡大小、溶气效率、气水比等参数密切相关,通常气水比控制在 $0.03\sim 0.05$,可根据废水水质调整优化。

物理处理技术的应用为后续处理工艺奠定了良好基础,其处理效果直接影响整体废水处理系统的运行效率与处理成本,是废水处理过程中不可或缺的重要环节。通过合理选择物理处理工艺及优化运行参数,可在低能耗、低成本的前提下实现废水预处理目标,为化学处理、生物处理等后续工序创造有利条件,提升整个处理系统的稳定性与经济性。

(二) 化学处理技术:中和、氧化还原、混凝沉淀等作用机制

化学处理技术通过化学反应改变废水中污染物的化学性质,使污染物转化为无害物质、易分离物质或可回收资源,具有处理效果稳定、针对性强、处理速度快等特点,适用于处理含有重金属、有毒有机物、酸碱物质等难以通过物理方法去除的废水,在工业废水处理中应用广泛,同时也可作为深度处理手段,确保废水达标排放或满足回用要求。化学处理技术的核心在于通过精准控制反应条件与药剂投加量,促使污染物发生预期的化学反应,实现污染物的有效去除与转化。

中和技术的作用机制是通过向酸性或碱性废水中投加相应的中和剂,调节废水pH值至 $6.5\sim 8.5$ 的中性范围,避免酸碱物质对生态环境造成破坏,同时防止后续处理设备被腐蚀。常见中和剂包括石灰、硫酸、碳酸钠、氢氧化钠等,不同中和剂的中和效果、成本及适用场景存在差异。石灰

价格低廉、中和能力强,适用于处理高浓度酸性废水,如化工生产废水、矿山酸性废水,但投加后会产生较多污泥,增加污泥处理成本;硫酸、氢氧化钠中和效果精准,适用于对处理精度要求较高的废水,如电子工业废水,但成本相对较高。中和技术适用于处理酸碱废水,如化工生产废水、电镀废水、印染废水等,在实际应用中需根据废水的酸碱浓度、流量及处理要求选择适配的中和剂与投加方式,确保pH值调节均匀稳定。氧化还原技术通过氧化或还原反应改变污染物的价态与结构,使污染物转化为无害物质或易分离物质,根据反应类型可分为氧化处理与还原处理。氧化处理采用氧化剂如高锰酸钾、过氧化氢、次氯酸钠等,将废水中的还原性污染物如氰化物、硫化物、亚铁离子等氧化为无害物质,高级氧化技术如芬顿氧化、臭氧氧化等还可分解难降解有机物,适用于处理含毒有害物质的工业废水;还原处理采用还原剂如亚硫酸钠、硫酸亚铁等,将废水中的氧化性污染物如六价铬、汞离子等还原为低毒或无毒物质,再通过沉淀等方法分离去除,适用于处理含铬、含汞等重金属废水。混凝沉淀技术通过投加絮凝剂使废水中的胶体颗粒与悬浮物质凝聚形成较大絮体,再通过沉淀分离去除,其作用机制包括电荷中和、吸附架桥、网捕卷扫等。胶体颗粒通常带有负电荷,絮凝剂投加后会释放正电荷离子,中和胶体颗粒的负电荷,使胶体颗粒失去稳定性而聚集;同时絮凝剂的高分子链会吸附多个胶体颗粒,形成更大的絮体;絮体在沉降过程中还会网捕部分悬浮颗粒,进一步提升去除效果。混凝沉淀技术是处理含胶体、浊度较高废水的常用技术,适用于生活污水预处理、印染废水脱色、造纸废水处理等场景,其处理效果受絮凝剂种类、投加量、pH值、搅拌速度等参数影响显著。

化学处理技术能够有效去除物理处理技术难以处理的污染物,提升废水处理的深度与广度,但其运行过程中需严格控制药剂投加量与反应条件,避免产生二次污染,确保处理效果与安全性。同时,化学处理技术的运行成本相对较高,通过优化药剂投加量、选用高效低成本药剂、回收利用反应产物等方式,可有效降低处理成本,提升技术的经济性与适用性。

(三) 生物处理技术:活性污泥法、生物膜法及厌氧消化法的核心原理

生物处理技术利用微生物的代谢作用分解废水中的有机污染物,将其转化为二氧化碳、水、微生物菌体等无害物质,部分工艺还可产生沼气等可再生资源,具有能耗低、环保性强、资源回收率高、二次污染风险小等特点,是生

生活污水及中低浓度有机工业废水处理的主流技术，在水资源循环利用中发挥着重要作用。生物处理技术的处理效果依赖于微生物的活性与代谢效率，因此需为微生物提供适宜的生长环境，包括温度、溶解氧、pH值、营养物质等。

活性污泥法的核心原理是利用由细菌、真菌、原生动物、后生动物等微生物组成的活性污泥，在好氧条件下分解废水中的有机物。活性污泥具有较强的吸附能力与氧化分解能力，废水与活性污泥混合接触后，有机物首先被活性污泥吸附，随后被微生物代谢分解为无害物质，微生物通过代谢有机物实现自身繁殖，使活性污泥量不断增加，部分剩余污泥需排出系统，维持污泥浓度稳定。处理过程需控制曝气强度、污泥回流比、污泥龄、溶解氧浓度等参数，维持微生物的活性与代谢效率。曝气强度直接影响溶解氧浓度与废水、污泥的混合效果，溶解氧浓度一般控制在 $2\text{mg/L} \sim 4\text{mg/L}$ ，确保好氧微生物正常代谢；污泥回流比通常为 $20\% \sim 50\%$ ，维持反应器内适宜的污泥浓度；污泥龄控制在 $5\text{d} \sim 15\text{d}$ ，避免污泥老化或流失。活性污泥法适用于大规模生活污水及有机工业废水处理，如城市污水处理厂、食品加工废水处理等，具有处理量大、处理效果稳定等优势，但也存在污泥产量大、易发生污泥膨胀等问题，需通过优化运行参数与工艺设计加以解决。生物膜法通过在载体表面形成生物膜，微生物附着于生物膜上生长繁殖，废水流经载体时，污染物被生物膜吸附并分解。生物膜由大量微生物及 extracellular polymeric substances (EPS) 组成，形成稳定的微生物群落结构，具有较强的环境适应性。常见工艺包括生物滤池、生物转盘、生物接触氧化池等，不同工艺的载体类型、运行方式存在差异。生物滤池以碎石、陶粒等为载体，废水自上而下喷淋流经载体，微生物在载体表面形成生物膜，具有处理负荷高、污泥产量少等优势，适用于中低浓度废水处理及小型污水处理站；生物转盘以圆形转盘为载体，转盘部分浸入废水，部分暴露于空气中，通过转盘转动使生物膜交替与废水、空气接触，实现有机物分解与溶解氧补充，运行稳定、维护方便，适用于中小型污水处理项目；生物接触氧化池将填料浸没于废水中，通过曝气提供溶解氧，微生物在填料表面形成生物膜，兼具活性污泥法与生物膜法的优势，处理效果稳定、耐冲击负荷能力强，适用于多种有机废水处理。厌氧消化法在无氧条件下利用厌氧微生物的代谢作用分解有机物，厌氧微生物包括产酸菌、产甲烷菌等，产酸菌将大分子有机物分解为小分子有机酸，产甲烷菌再将有机酸转化为甲烷、二氧化碳等气体，产生的沼气可作为能源回收利用，同时实

现污染物去除。厌氧消化法适用于高浓度有机废水处理，如畜禽养殖废水、食品加工废水、酿酒废水等，处理过程无需曝气，能耗低，还可实现能源回收，但处理周期较长，通常为 $10\text{d} \sim 30\text{d}$ ，受温度影响较大，适宜温度范围为 $30^\circ\text{C} \sim 38^\circ\text{C}$ （中温消化）或 $50^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ （高温消化）。

生物处理技术符合绿色环保与资源循环的发展理念，其处理效果与微生物活性密切相关，通过优化微生物生长环境与工艺参数，可进一步提升技术的适配性与处理效率。随着微生物技术的发展，生物处理技术不断升级，新型功能微生物、生物反应器的应用的，推动生物处理技术向高效化、稳定化、智能化方向发展，扩大其在复杂废水处理中的应用范围。

二、废水处理技术发展面临的挑战

（一）技术层面的瓶颈问题

随着工业生产的多元化、新型化工产品的广泛应用及生活方式的转变，废水成分日趋复杂，污染物种类不断增加，处理难度持续加大，现有废水处理技术在适配性、稳定性、高效性及资源化利用方面仍存在诸多需要提升的地方，这些问题相互交织，成为制约废水处理行业高质量发展的重要因素，需通过技术创新与优化升级逐步突破。

复杂废水成分对处理工艺的适应性限制较为明显，部分工业废水如化工废水、印染废水、电子废水等，含有多有毒有害物质、难降解有机物及复合污染物，这些污染物结构稳定、毒性强，单一处理技术难以实现达标处理，多技术组合的协同效果仍有待提高。例如，部分化工废水中同时含有苯系物、重金属、杂环化合物等污染物，物理处理仅能去除悬浮颗粒，化学处理对部分难降解有机物分解效果有限，生物处理则受有毒物质抑制，需优化组合工艺的流程与参数，提升协同处理效果。低温、低营养等极端条件下生物处理效率下降的问题突出，低温环境会显著抑制微生物的代谢活性，降低污染物分解速率，当温度低于 10°C 时，好氧生物处理效率可下降 $30\% \sim 50\%$ ，厌氧生物处理效率下降更为明显；低营养条件则无法满足微生物生长需求，导致微生物数量减少、活性降低，生物处理系统稳定性不足，处理效果波动较大。此外，部分处理技术的污泥产量较大，如混凝沉淀技术、活性污泥法等，污泥中可能含有重金属、有毒有机物等污染物，污泥无害化处理与资源化利用率仍有待提高，若处理不当，容易造成二次污染风险，增加环境压力。同时，新兴污染物如微塑料、药物残留、抗生素等的去除难题日益凸显，这类污染物浓

度低、毒性强、难降解,现有常规处理技术对其去除效果有限,针对性处理技术的研发与应用仍需加强。

这些技术层面的瓶颈问题需要通过技术创新与优化升级逐步解决,推动废水处理技术向高效化、稳定化、低能耗、资源化方向发展,满足日益增长的环保需求与复杂的废水处理场景。同时,需加强多学科融合,结合微生物学、材料学、化学工程等多领域技术,开发新型处理工艺与设备,提升废水处理技术的综合竞争力。

(二) 政策与标准对技术升级的驱动作用

环保政策与排放标准的不断完善,为废水处理技术的升级迭代提供了明确导向,同时也对技术的精准性、环保性、低碳性及资源化利用水平提出了更高要求,推动行业从传统处理模式向高质量、可持续发展模式转型。政策与标准的刚性约束促使企业加大技术研发与改造投入,主动优化废水处理工艺,提升处理效果与环保水平。

排放标准趋严对处理技术精度的要求持续提高,各地不断收紧废水中常规污染物的排放限值,同时新增了对新兴污染物的控制要求,倒逼企业升级处理技术,提升污染物去除的精准度与稳定性。例如,对生活污水中化学需氧量、氨氮等常规污染物的排放限值进一步降低,要求工业废水实现分行业精准达标,部分行业还新增了总氮、总磷、重金属等特征污染物的排放控制指标。这就要求企业不能仅依靠传统处理技术,需引入高级氧化、深度过滤、精准生物处理等先进技术,确保各类污染物稳定达标排放。碳减排政策对废水处理能源结构优化的引导作用显著,废水处理过程中的能耗较高,尤其是曝气、污泥处理、水泵运行等环节,是行业碳排放的主要来源。碳减排目标推动企业优化能源消耗结构,推广低能耗技术与可再生能源应用,降低处理过程中的碳排放。例如,优化曝气系统设计,采用高效节能曝气设备,减少曝气能耗;利用太阳能、风能等可再生能源为污水处理厂供电,替代传统化石能源;通过污泥厌氧消化产生沼气,实现能源自给自足,降低碳排放强度。此外,政策对废水资源化利用的鼓励力度不断加大,出台了一系列支持中水回用、水资源循环利用的政策措施,要求企业提升中水回用率,推动处理技术向资源回收方向升级。例如,鼓励工业企业将处理后的废水用于生产冷却、绿化灌溉等,城市污水处理厂出水用于河道补给、市政用水等,这就要求废水处理技术不仅能实现污染物去除,还需满足回用水质要求,推动深度处理技术与回用系统的优化升级。

政策与标准的驱动为废水处理技术的发展提供了动

力,企业需主动适应政策要求,加大技术研发投入,加强与科研机构的合作,通过技术优化实现达标排放、低碳环保与资源回收的多重目标。同时,政策层面也需完善配套支持措施,鼓励技术创新与成果转化,推动废水处理行业形成良性发展格局。

三、废水物理处理技术的优化策略

(一) 新型过滤材料的研发与过滤效率提升

新型过滤材料的研发与应用是提升物理过滤技术效率的核心方向,通过优化过滤材料的结构、孔径分布、表面性质及吸附性能,可增强材料对污染物的截留能力与吸附效果,延长过滤周期,减少反冲洗频率,降低运行成本与能耗,推动过滤技术向高效化、长效化、多功能化方向发展,适配复杂废水的处理需求。

研发人员可聚焦于复合过滤材料的制备,将传统过滤材料与功能性材料有机结合,发挥各组分的协同作用,提升材料的综合性能。例如,将石英砂与纳米级吸附材料如纳米二氧化钛、纳米氧化锌等复合,纳米材料具有较大的比表面积与较强的吸附能力,可增强对微小颗粒、重金属离子及部分溶解性有机物的去除能力,同时纳米二氧化钛还具有光催化性能,可在光照条件下分解部分有机污染物,提升过滤材料的多功能性;将活性炭与纤维材料复合,制备活性炭纤维过滤材料,兼具活性炭的吸附性能与纤维材料的截留能力,过滤精度更高,吸附容量更大,适用于深度处理中去除微小颗粒、异味及有机物。此外,开发多孔性、高比表面积的过滤材料,如改性活性炭、陶瓷滤膜、多孔陶瓷材料等,通过优化材料的制备工艺,调整孔径结构,使孔径分布更均匀,提高过滤精度与通量。例如,对活性炭进行改性处理,通过酸碱改性、氧化改性等方法,增加活性炭表面的活性位点,提升对特定污染物的吸附选择性;陶瓷滤膜具有耐高温、耐酸碱、化学稳定性强等优势,通过优化制备工艺,将陶瓷滤膜的孔径控制在 $0.1\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$,可有效去除微小颗粒、胶体及细菌,适用于高温、腐蚀性废水处理。同时,通过表面改性技术优化过滤材料的表面性质,降低污染物在材料表面的吸附附着,减少堵塞现象,延长材料使用寿命。例如,对过滤材料进行疏水改性,降低水分子与材料表面的亲和力,减少杂质在表面的沉积;采用涂层技术在材料表面形成一层光滑的保护膜,阻碍污染物的吸附与附着,便于反冲洗,提升材料的重复利用率。在实际应用中,需根据废水水质特点如污染物类型、浓度、粒径分布等选择适配的过滤材料,针对高浊度

废水可选用大孔径、高纳污量的材料如陶粒、石英砂复合材料，确保过滤通量与处理效率；针对低浊度深度处理可选用高精度滤膜材料如超滤膜、纳滤膜，提升出水水质。

新型过滤材料的研发与应用能够显著提升过滤技术的处理效率与稳定性，减少过滤环节的能耗与药剂消耗，降低反冲洗频率与污泥产量，为后续处理工艺降低负荷，推动整个废水处理系统的优化升级。同时，多功能复合过滤材料的应用还可拓展过滤技术的应用场景，使其不仅能实现污染物截留，还能兼具吸附、催化分解等功能，提升废水处理的深度与广度。

（二）气浮技术中溶气系统的改进与能耗降低

溶气系统是气浮技术的核心组成部分，其运行效率直接影响气浮技术的处理效果、能耗水平及运行稳定性，通过改进溶气系统的结构设计、优化溶气设备与运行参数，可显著提升溶气效率，增加微小气泡的产量与稳定性，减少能源消耗，增强气浮技术的经济性与适用性，适配不同类型废水的处理需求。

溶气系统的改进可从溶气设备与溶气方式两方面入手，优化溶气泵的结构设计是提升溶气效率的关键。选用高效节能型溶气泵，通过优化泵体流道、叶轮结构，提升吸气效率与溶气效果，减少能耗损失。溶气泵吸气量可控制在过水流量的8%~10%，确保气泡产生量与废水处理需求匹配，同时通过调整泵的转速，实现吸气量与溶气压力的精准调控，适配不同水质的处理需求。改进潜水溶气叶轮的结构，根据处理水量与作用范围优化叶轮尺寸、转速及叶片角度，增强气泡的均匀性与稳定性，减少气泡聚合现象。例如，采用多叶片、低转速的叶轮设计，可产生更多直径细小、分布均匀的气泡，气泡直径控制在 $20\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ ，提升气泡与污染物的接触面积及吸附效率；在叶轮周围设置导流装置，引导水流与气泡充分混合，避免气泡在局部聚集，提升溶气效果。同时，优化溶气压力与溶气时间等运行参数，根据废水水质如污染物类型、浓度、颗粒大小等调整溶气压力在 $0.3\text{MPa}\sim 0.5\text{MPa}$ ，溶气时间控制在 $2\text{min}\sim 5\text{min}$ ，实现溶气效率与能耗的平衡。溶气压力过高会增加能耗与设备损耗，过低则溶气效率不足；溶气时间过长会导致气泡聚合，过短则气体溶解不充分，需通过试验确定最优参数组合。此外，可采用溶气水回流技术，将部分处理后的清水回流至溶气系统，降低进水浊度对溶气效果的影响，同时回流清水的水质稳定，可提升溶气效率与气泡稳定性，进一步提升能耗利用率。还可在溶气系统中增设气泡切割装置，将聚合后的大气泡切割为微小气泡，

提升气泡利用率；优化释放器结构，采用高效释放器，确保溶气水在释放时能产生大量微小气泡，避免气泡逃逸。

溶气系统的改进与优化能够有效降低气浮技术的运行能耗，提升气泡利用率与污染物去除效果，扩大气浮技术在各类废水处理中的应用范围，如含油废水、印染废水、造纸废水、食品加工废水等，增强物理处理技术的综合竞争力。同时，优化后的溶气系统运行更稳定，维护成本更低，为气浮技术的规模化应用与推广提供了有力支撑。

（三）沉淀技术的工艺优化与高效运行控制

沉淀技术作为物理处理的核心工艺之一，其处理效果直接影响后续工序的运行负荷与处理效率。通过优化沉淀池结构设计、改进排泥系统、精准调控运行参数，可显著提升沉淀效率，减少占地面积与污泥停留时间，降低能耗与运行成本，解决传统沉淀工艺中存在的水流短路、污泥沉积、处理效率不足等问题，适配不同水量与水质的处理需求。

沉淀池结构优化是提升沉淀效果的关键，核心在于优化水流状态与沉淀空间利用率，减少水体积与水流扰动，为悬浮颗粒沉降创造稳定环境。针对平流式沉淀池，可通过增设导流墙、优化进水穿孔墙布置，使水流均匀分布于沉淀池断面，避免局部流速过高导致颗粒悬浮，同时延长水流停留时间，提升沉降效果。例如，在平流式沉淀池进水端设置锯齿形导流墙，引导水流平稳扩散，将水流不均匀系数控制在1.2以内，有效减少短路现象，沉淀效率可提升15%~20%；在池底设置坡度优化的污泥斗，坡度控制在 $0.01\sim 0.02$ ，便于污泥聚集与排出，减少污泥在池底的沉积时间。对于竖流式沉淀池，可优化中心管直径与出水堰结构，中心管流速控制在 $30\text{mm/s}\sim 50\text{mm/s}$ ，确保废水均匀上升，避免上升流速过快携带颗粒上浮；采用锯齿形出水堰替代传统直线型出水堰，提升出水均匀性，减少堰口溢流对沉淀区域的扰动，同时便于堰口清洁维护。辐流式沉淀池则可通过优化刮泥机结构与转速，采用全桥或半桥式刮泥机，搭配螺旋推进式排泥装置，刮泥转速控制在 $0.5\text{r/h}\sim 1\text{r/h}$ ，避免刮泥过程中扰动已沉降的污泥，提升污泥排出效率，减少污泥在池内的停留时间，降低污泥腐败风险。

运行参数的精准调控与辅助技术应用可进一步提升沉淀工艺的高效性与稳定性。根据废水水质与水量波动，动态调整水力停留时间、水流速度等核心参数，对于高浊度废水，适当延长停留时间至 $2.5\text{h}\sim 3.5\text{h}$ ，降低水流速度至 $8\text{mm/s}\sim 15\text{mm/s}$ ，确保悬浮颗粒充分沉降；对于低浊度废水，可缩短停留时间至 $1\text{h}\sim 1.5\text{h}$ ，提高水流速度至 $15\text{mm/s}\sim$

20mm/s,提升处理效率与水资源利用率。同时,引入斜管(斜板)沉淀技术作为传统沉淀工艺的强化手段,通过在沉淀池内设置倾斜的管状或板状组件,增加沉淀面积,缩短颗粒沉降距离,提升沉淀速度与处理负荷。斜管(斜板)的倾斜角度通常控制在 60° 左右,材质选用聚丙烯、聚氯乙烯等耐腐蚀材料,可使沉淀池处理负荷提升2~3倍,占地面积减少50%以上,适用于中小型污水处理站及高浊度废水预处理场景。此外,优化排泥系统运行,采用自动排泥装置,根据污泥浓度计实时监测数据调整排泥频率与排泥量,将池底污泥浓度控制在合理范围,避免污泥过量堆积导致水质恶化,同时减少排泥过程中的水资源浪费。

沉淀技术的工艺优化与高效运行控制,能够在低成本、低能耗的前提下显著提升处理效果与运行稳定性,解决传统工艺的固有缺陷,与新型过滤材料、优化溶气系统形成互补,完善物理处理技术优化体系。通过结构改进、参数调控与辅助技术融合,沉淀工艺可更好地适配复杂废水处理需求,为后续化学、生物处理工序提供更优质的进水质,推动整个废水处理系统的高效协同运行。

四、废水化学处理技术的优化路径

(一) 高效絮凝剂的筛选与投加量精准控制

高效絮凝剂的筛选与投加量精准控制是优化化学混凝沉淀技术的关键,通过选用适配性强、絮凝效果好、环保性优的絮凝剂,结合精准投加技术与智能调控手段,可显著提升污染物去除效率,减少药剂浪费,降低处理成本与二次污染风险,推动混凝沉淀技术向精准化、环保化、高效化方向发展,适配复杂废水的处理需求。

絮凝剂的筛选需结合废水水质特点如污染物类型、浓度、pH值、浊度等,优先选用高效、环保、易生物降解的微生物絮凝剂,这类絮凝剂主要由微生物代谢产生,核心成分为糖蛋白、黏多糖、蛋白质等高分子化合物,具有絮凝范围广、活性高、无二次污染、可生物降解等优势,适用于处理含胶体、有机物、色度的废水,如印染废水、生活污水、食品加工废水等。微生物絮凝剂的絮凝效果受温度、pH值、投加量等参数影响较小,环境适应性强,且不会像无机絮凝剂那样产生大量污泥,也不会像有机合成絮凝剂那样存在残留毒性问题。针对不同废水成分,可筛选定制化复合絮凝剂,通过复配不同类型的絮凝剂,发挥各组分的协同作用,增强对特定污染物的去除能力。例如,将微生物絮凝剂与无机絮凝剂如聚合氯化铝、聚合硫酸铁复配,无机絮凝剂可快速中和胶体颗粒电荷,微生物絮凝

剂则通过吸附架桥作用形成更大絮体,提升对重金属与悬浮物的协同去除效果;将有机絮凝剂如聚丙烯酰胺与无机絮凝剂复配,可减少无机絮凝剂的投加量,降低污泥产量,同时提升絮凝速度与效果。在筛选絮凝剂时,还需考虑药剂的成本、来源及稳定性,确保筛选出的絮凝剂兼具处理效果与经济性。投加量精准控制可通过在线监测技术与智能控制系统实现,实时监测废水的浊度、pH值、污染物浓度、Zeta电位等参数,这些参数直接反映废水的絮凝特性,可作为调整絮凝剂投加量的依据。通过建立参数与投加量的关联模型,结合智能控制系统自动调整絮凝剂投加量,避免投加过量或不足,确保絮凝效果稳定,同时减少药剂消耗。例如,当监测到废水浊度升高时,自动增加絮凝剂投加量;当Zeta电位接近零电位时,维持当前投加量,确保胶体颗粒充分凝聚。此外,需控制投加过程中的搅拌速度与时间,搅拌分为快速搅拌与慢速搅拌两个阶段,快速搅拌速度控制在 $100\text{r/min} \sim 200\text{r/min}$,时间为 $1\text{min} \sim 3\text{min}$,使絮凝剂与废水充分混合;慢速搅拌速度控制在 $20\text{r/min} \sim 50\text{r/min}$,时间为 $10\text{min} \sim 20\text{min}$,促进絮体形成与成长,避免搅拌强度过大破坏絮体结构。

高效絮凝剂的筛选与投加量精准控制能够显著提升混凝沉淀技术的处理效果与经济性,减少药剂消耗与污泥产量,降低二次污染风险,推动化学处理技术向精准化、环保化方向发展。同时,定制化复合絮凝剂的应用与智能投加系统的推广,可提升混凝沉淀技术对复杂废水的适配性,为后续处理工艺创造有利条件,提升整个废水处理系统的稳定性与处理效率。

(二) 氧化还原工艺中催化剂的复配与反应条件优化

催化剂的复配与反应条件优化是提升氧化还原工艺处理效率的核心路径,通过优化催化剂性能、调控反应参数,可加快氧化还原反应速率,增强对难降解污染物的去除能力,降低氧化剂投加量与能耗,拓展工艺的应用范围,使氧化还原工艺更适配高难度废水的处理需求,提升技术的经济性与稳定性。

催化剂的复配需结合氧化还原反应类型与污染物特性,选用活性高、稳定性好、寿命长、成本低的催化剂组分,通过复配不同类型的催化剂,发挥组分间的协同催化作用,提升整体催化效果,突破单一催化剂的性能局限。例如,将过渡金属氧化物如二氧化锰、三氧化二铁、氧化铜等与贵金属催化剂如铂、钯、银等复配,过渡金属氧化物具有活性高、成本低的优势,贵金属催化剂具有稳定性强、催化选择性好的特点,二者复配后可增强对有毒有机

物如苯系物、酚类、杂环化合物等的氧化分解能力，同时延长催化剂使用寿命；将光催化剂如纳米二氧化钛与过渡金属氧化物复配，可提升光催化氧化反应的效率，拓宽光响应范围，使反应在可见光条件下即可高效进行，降低能耗。同时，优化催化剂的制备工艺，通过浸渍法、沉淀法、溶胶-凝胶法等制备技术，提升催化剂的比表面积与活性位点数量，增强催化剂与污染物、氧化剂的接触效率，提升催化性能。例如，采用溶胶-凝胶法制备复合催化剂，可使各组分均匀分散，形成稳定的晶体结构，增加活性位点，提升催化效率；通过负载技术将催化剂负载于活性炭、陶瓷等载体上，可提高催化剂的机械强度与重复利用率，减少催化剂流失，降低处理成本。反应条件优化需重点控制反应温度、pH值、氧化剂投加量、反应时间等关键参数，根据废水水质特点调整参数组合，确保催化剂活性与反应效率最大化，同时避免氧化剂过量造成二次污染与成本增加。反应温度通常控制在 $25^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ ，温度过高会增加能耗与设备损耗，过低则反应速率缓慢；维持适宜的pH值范围，不同催化剂的最佳pH值存在差异，如芬顿反应的最佳pH值为 $2 \sim 4$ ，臭氧氧化反应的最佳pH值为 $8 \sim 10$ ，需根据催化剂类型与反应类型调整；合理控制氧化剂投加量，氧化剂与污染物的摩尔比通常为 $3:1 \sim 10:1$ ，可通过试验确定最优比例，确保污染物充分分解，同时减少氧化剂残留；反应时间控制在 $30\text{min} \sim 120\text{min}$ ，确保反应充分进行，提升污染物去除效果。此外，可通过搅拌、曝气等方式提高反应体系的传质效率，促进催化剂、氧化剂与污染物的充分接触，加快反应速率；在反应过程中实时监测污染物浓度与反应进度，动态调整反应参数，确保反应稳定高效进行。

催化剂的复配与反应条件优化能够有效提升氧化还原工艺的处理效率与稳定性，增强对难降解污染物的去除能力，降低工艺运行成本与能耗，减少二次污染风险，为高难度废水如化工废水、印染废水、电子废水等处理提供可靠技术支撑。同时，新型复合催化剂的研发与反应条件的精准调控，推动氧化还原工艺向高效化、低碳化、多功能化方向发展，拓展其在废水深度处理中的应用范围。

（三）中和工艺的精准调控与药剂高效利用

中和工艺作为化学处理的基础环节，其优化核心在于实现pH值的精准调控、提升药剂利用率、减少污泥产量与能耗，解决传统中和工艺中药剂投加过量、反应不均、污泥量大等问题，适配不同酸碱浓度、水质波动大的废水处理场景，为后续处理工艺提供稳定的水质环境，保障整体处理系统的高效运行。

中和药剂的选型与复配需结合废水酸碱特性、处理成本及环保要求，实现药剂效能最大化。针对高浓度酸性废水，可采用石灰与白云石复配的中和剂，石灰中和反应速率快、中和能力强，白云石价格低廉、可减缓反应剧烈程度，避免局部pH值突变，同时减少石灰投加量，降低污泥产量；针对低浓度酸性废水，选用碳酸钠与氢氧化钠复配，碳酸钠成本低于氢氧化钠，可初步调节pH值，氢氧化钠精准微调pH值至目标范围，兼顾经济性与调控精度。对于碱性废水，优先选用硫酸与二氧化碳复配，硫酸中和效果稳定，二氧化碳作为气态中和剂，可避免药剂投加过量导致的酸性超标，且反应产物为碳酸盐，无二次污染风险，适用于对出水水质要求较高的场景如电子工业废水。此外，可引入工业废渣等再生中和剂，如冶炼废渣、煤矸石等，这类废渣富含钙、镁等碱性成分，可替代部分传统中和剂，实现固废资源化利用，降低处理成本，但需提前检测废渣成分，避免引入重金属等杂质造成二次污染。

中和反应的精准调控依赖于在线监测与智能投加系统，通过实时监测与动态调整，实现反应过程的高效稳定。采用pH在线监测仪、ORP氧化还原电位监测仪等设备，实时采集废水pH值、酸碱浓度、流量等参数，数据传输至智能控制系统，建立参数与药剂投加量的关联模型，根据水质波动自动调整投加量，控制中和反应pH值波动范围在 ± 0.2 以内，避免投加过量或不足。例如，处理化工废水时，通过分段式投加策略，在前端投加80%的中和剂进行初步中和，后端设置微调池，根据在线监测数据补加剩余药剂，确保出水pH值稳定在 $6.5 \sim 8.5$ 的标准范围。同时，优化反应搅拌方式与时间，采用分级搅拌模式，前端快速搅拌（转速 $80\text{r/min} \sim 120\text{r/min}$ ，时间 $2\text{min} \sim 3\text{min}$ ）使药剂与废水充分混合，后端慢速搅拌（转速 $30\text{r/min} \sim 50\text{r/min}$ ，时间 $5\text{min} \sim 8\text{min}$ ）促进反应充分进行，避免局部反应不彻底导致的水质波动。此外，通过污泥回流技术提升药剂利用率，将中和反应产生的部分污泥回流至反应池，污泥中的未反应药剂可继续参与中和反应，同时污泥颗粒可作为晶核，促进沉淀物形成，减少药剂投加量与污泥产量，药剂利用率可提升 $15\% \sim 25\%$ 。

中和工艺的精准调控与药剂高效利用，能够显著降低处理成本、减少污泥产量与二次污染风险，提升工艺的稳定性与经济性。通过药剂复配、智能投加与工艺优化的结合，中和工艺可更好地适配复杂废水的酸碱调节需求，为后续化学氧化、混凝沉淀、生物处理等工序提供稳定的水质基础，推动整个废水处理系统的协同高效运行。

五、废水生物处理技术的强化措施

(一) 微生物菌种的选育与功能强化

微生物菌种的选育与功能强化是提升生物处理技术效率的核心手段,通过筛选驯化高效功能菌种、构建复合菌剂、优化微生物群落结构,可显著增强微生物对污染物的降解能力、环境适应性及抗冲击负荷能力,提升生物处理系统的稳定性与处理效果,拓宽生物处理技术对复杂废水与极端环境的适配范围,推动生物处理技术向高效化、定制化、精准化方向发展。

菌种选育可通过原位富集、复合诱变、梯度驯化、基因工程等多种技术手段,从活性污泥、污水处理厂曝气池、极端环境如低温环境、高盐环境、含毒废水环境等场景中筛选出降解效率高、耐环境胁迫能力强的微生物菌株,如耐低温、耐高盐、耐重金属、降解难降解有机物的菌株。原位富集技术通过在目标废水环境中持续投加特定污染物,诱导土著微生物中高效降解菌株的繁殖与富集,再通过分离纯化技术获得目标菌株,这类菌株对目标废水的适配性强,驯化周期短;复合诱变技术结合物理诱变如紫外线、 γ 射线与化学诱变如亚硝基胍、硫酸二乙酯等方法,诱导微生物基因突变,提升菌株的降解能力与环境适应性,筛选出性能更优异的突变菌株;梯度驯化技术通过逐步提高废水污染物浓度、降低温度、调整盐度等方式,驯化微生物菌株适应极端环境,增强菌株的耐胁迫能力,例如在低温生物处理系统中,通过逐步将温度从25℃降至5℃,驯化出耐低温的功能菌株,维持低温条件下的处理效率。针对不同废水成分,构建定制化复合菌剂,将多种功能菌株如降解有机物菌株、脱氮菌株、除磷菌株、耐胁迫菌株等复配,发挥菌株间的协同代谢作用,提升对复杂污染物的综合降解能力,同时增强菌剂的环境适应性。复合菌剂的污染物耐受浓度可提升2倍~3倍,成活率显著提高,能够有效应对废水水质波动与极端环境胁迫。例如,处理含难降解有机物与氮磷的复合废水时,将降解酚类菌株、硝化细菌、反硝化细菌、聚磷菌复配,形成复合菌剂,实现有机物降解与脱氮除磷的同步进行。同时,通过基因工程技术对菌种进行改良,将高效降解基因导入微生物体内,增强菌种的特定降解功能与环境适应性,优化菌种的代谢途径,提升降解效率。例如,将降解苯环化合物的基因导入大肠杆菌,构建基因工程菌株,增强其对苯系物废水的处理能力;通过基因编辑技术优化微生物的代谢调控机制,减少代谢产物对自身的抑制,提升降解效率。在应用过程

中,需为强化菌种提供适宜的生长环境,补充必要的营养物质如碳源、氮源、磷源、微量元素等,控制适宜的温度、pH值、溶解氧浓度等参数,确保菌种能够快速繁殖并发挥功能,减少与土著微生物的竞争抑制,同时可通过投加微生物促生剂,提升菌种的活性与繁殖速率。

微生物菌种的选育与功能强化能够有效提升生物处理技术对复杂废水与极端环境的适配性,提高污染物降解效率,缩短处理周期,减少污泥产量,降低运行成本,推动生物处理技术向高效化、定制化方向发展。同时,新型功能菌株与复合菌剂的应用,可突破传统生物处理技术的局限,拓展其在高难度废水处理中的应用范围,为生物处理技术的升级迭代提供核心支撑。

(二) 生物反应器结构改进与运行参数动态调控

生物反应器结构改进与运行参数动态调控是优化生物处理过程的重要途径,通过优化反应器结构设计、创新反应器类型、实时调整运行参数,可显著提高传质效率与微生物附着能力,维持微生物活性与群落结构稳定,提升生物处理系统的处理负荷、抗冲击能力与稳定性,降低能耗与运行成本,为生物处理技术的规模化、智能化应用提供保障。

生物反应器结构改进可聚焦于提升传质效率与微生物附着能力,优化反应器内部流道设计,减少死体积,避免废水短路,使废水与微生物充分接触,提升反应效率。例如,在活性污泥反应器中设置导流板、挡板等结构,优化水流状态,使水流呈推流式与完全混合式结合的流态,增强废水与活性污泥的混合效果;在厌氧反应器中优化布水装置,采用均匀布水设计,确保废水均匀分布于反应器内,避免局部负荷过高或过低,提升厌氧微生物的代谢效率。对于生物膜反应器,可优化载体结构与布置方式,增大载体比表面积,提升生物膜附着量与更新速率,提高传质效率。载体材料可选用聚氨酯泡沫、陶粒、活性炭纤维、聚乙烯填料等,通过优化载体的孔径、孔隙率、表面粗糙度等参数,增强微生物附着能力,例如采用多孔聚氨酯泡沫载体,孔隙率可达80%~90%,比表面积大,有利于生物膜的形成与更新;将载体采用分层布置或悬浮式布置,提升废水与生物膜的接触面积,促进传质过程。开发集成化、模块化生物反应器,如膜生物反应器(MBR)、序批式生物反应器(SBR)、厌氧氨氧化反应器(ANAMMOX)等,将生物降解与其他处理功能有机结合,提升出水水质与处理效率,同时减少占地面积。膜生物反应器将生物降解与膜分离技术结合,通过膜组件实现固液分离,替代传统二

沉池，出水水质好，污泥浓度高，处理负荷大，占地面积仅为传统活性污泥法的1/3~1/2，适用于生活污水深度处理与中水回用；序批式生物反应器采用间歇式运行模式，集进水、反应、沉淀、排水、闲置等工序于一体，结构简单，操作灵活，抗冲击负荷能力强，适用于中小型污水处理项目；厌氧氨氧化反应器利用厌氧氨氧化菌将氨氮与亚硝酸盐氮转化为氮气，实现脱氮，能耗低，污泥产量少，适用于高氨氮废水处理。运行参数动态调控可通过智能监测系统与自动控制系统实现，实时监测反应器内的溶解氧浓度、pH值、污泥浓度、温度、氨氮浓度、COD浓度等关键参数，根据进水水质、水量及处理效果动态调整曝气强度、水力停留时间、污泥回流比、污泥龄、营养物质投加量等参数，确保微生物代谢活动稳定高效。溶解氧浓度控制在2mg/L~4mg/L，对于硝化反应阶段可适当提高溶解氧浓度至3mg/L~5mg/L，反硝化阶段则控制溶解氧浓度低于0.5mg/L；水力停留时间根据废水类型调整为8h~24h，高浓度有机废水可延长至24h~48h，低浓度废水可缩短至6h~8h；污泥回流比控制在20%~80%，根据污泥浓度与处理效果调整；污泥龄控制在5d~20d，避免污泥老化或流失。此外，可采用分段式调控策略，针对反应器不同区域的功能需求优化参数设置，如在氧化沟反应器中，将反应器分为好氧区、缺氧区、厌氧区，分别控制不同的溶解氧浓度与运行参数，实现脱氮除磷同步进行；在生物膜反应器中，通过调整水流速度，控制生物膜厚度在0.5mm~2mm，避免生物膜过厚导致传质受阻或脱落。

生物反应器结构改进与运行参数动态调控能够有效提升生物处理系统的运行效率与稳定性，降低能耗与运行成本，增强系统的抗冲击负荷能力与对复杂废水的适配性，为生物处理技术的规模化、智能化应用提供保障。同时，新型集成化生物反应器的研发与智能调控系统的推广，推动生物处理技术向高效化、节能化、智能化方向发展，助力废水处理行业的高质量发展。

（三）生物处理系统的营养调控与抗冲击强化

生物处理系统的稳定运行依赖于适宜的营养环境与抗冲击能力，通过精准调控营养配比、优化运行工况、强化系统缓冲能力，可有效解决营养失衡、负荷波动导致的微生物活性下降、处理效果波动等问题，提升生物处理系统的稳定性与适配性，确保在复杂水质与负荷变化场景下仍能高效运行。

营养物质的精准调控是维持微生物代谢活性的核心，需确保碳源、氮源、磷源及微量元素的配比适配微生物生

长需求，通常控制C:N:P比例在100:5:1左右，同时补充必要的微量元素如铁、锌、锰等，激活微生物酶活性，促进代谢过程高效进行。针对低营养废水如部分工业废水，可投加外源营养物质，选用易生物降解的碳源如乙酸钠、葡萄糖、淀粉等，其中乙酸钠利用率高、见效快，适用于应急营养补充；葡萄糖、淀粉成本较低，适用于长期营养调控，同时可搭配尿素、磷酸二氢钾补充氮源与磷源，确保营养均衡。对于高氮磷废水如畜禽养殖废水，需优化营养配比，通过分段式处理调整各阶段营养浓度，避免氮磷过量导致出水超标，同时可投加微生物促生剂，提升微生物对氮磷的代谢效率，强化脱氮除磷效果。此外，需控制营养物质投加节奏，采用分批投加模式，避免一次性投加过量导致局部营养富集，引发污泥膨胀或二次污染，通过在线监测氨氮、总磷、COD等参数，动态调整投加量，确保营养供给与微生物需求精准匹配。

抗冲击负荷能力强化需从工况优化、系统结构调整、应急调控三个维度入手，提升系统对水质水量波动的适应能力。工况优化方面，通过调整水力停留时间、污泥龄、曝气强度等参数，构建弹性运行模式，例如在进水负荷升高时，适当延长水力停留时间、提高污泥回流比，维持反应器内污泥浓度稳定，避免微生物流失；在进水负荷降低时，减少曝气强度、缩短污泥龄，降低能耗与污泥产量。系统结构调整方面，可增设缓冲池、调节池，缓解进水水质水量波动对生物处理单元的冲击，调节池有效容积需满足至少4小时~8小时的废水停留需求，确保进入生物反应器的废水水质水量均匀稳定；对于复杂废水处理系统，可采用多级生物处理串联模式，如厌氧—缺氧—好氧（A²O）工艺，各级单元分工协作，提升系统对负荷波动的缓冲能力与污染物去除效果。应急调控方面，建立水质水量预警机制，通过在线监测设备实时捕捉进水浓度、pH值、温度等参数突变信号，及时启动应急方案，如投加应急碳源、调整药剂投加量、开启备用反应器等，避免冲击负荷对系统造成不可逆影响。例如，当进水pH值突变至酸性范围时，立即向调节池投加中和剂，同时投加微生物保护剂，减少酸性环境对微生物的抑制，维持系统处理效率。

此外，可通过接种功能微生物、优化微生物群落结构，进一步强化系统抗冲击能力，例如接种耐高负荷、耐毒性的复合菌剂，提升微生物群落的多样性与稳定性，减少单一菌种对环境波动的敏感性。同时，定期对生物处理系统进行维护与调试，清理反应器内的积泥、浮渣，检查曝气设备、搅拌设备运行状态，确保系统工况稳定，为微生物

生长与代谢提供良好环境,推动生物处理系统长期高效稳定运行。

六、废水处理技术组合应用模式

(一) 物理—化学联合处理工艺

物理—化学联合处理工艺通过整合物理处理与化学处理技术的优势,实现不同处理环节的协同互补,扬长避短,提升对复杂废水的处理效果、处理效率与出水水质,适用于单一技术难以达标处理的高难度废水如化工废水、印染废水、电子废水、含油废水等,是废水处理领域的重要发展方向,能够有效突破单一技术的处理局限,拓展废水处理的适用范围。

预处理阶段物理方法与化学药剂的协同作用可有效降低废水负荷,去除大部分悬浮颗粒、胶体物质及部分溶解性污染物,调节废水水质,为后续处理工序创造有利条件,提升后续处理效率,减少后续处理的药剂消耗与设备损耗。常用模式为物理过滤与化学预处理结合,如通过石英砂过滤、格栅过滤去除大颗粒杂质与悬浮物质后,投加中和剂调节废水pH值至适宜范围,避免酸碱物质对后续化学处理药剂与设备造成影响;或投加少量絮凝剂、助凝剂,去除胶体物质与部分有机物,降低废水浊度,提升后续化学氧化、化学沉淀等工艺的处理效果。例如,处理印染废水时,预处理阶段采用格栅过滤去除纤维杂质,再通过气浮技术去除悬浮颗粒与部分浮色,随后投加硫酸亚铁等药剂进行脱色预处理,降低废水色度与有机物浓度,为后续深度处理降低负荷。深度处理中化学氧化与物理吸附的互补机制可实现污染物的深度去除,确保出水达标排放或满足回用要求。化学氧化技术如芬顿氧化、臭氧氧化、高级氧化技术等可高效分解难降解有机物,将大分子有机物转化为小分子物质,但部分氧化产物可能仍存在残留,且氧化过程中可能产生少量副产物;物理吸附技术如活性炭吸附、沸石吸附等可有效去除氧化产物、残留污染物及副产物,同时吸附部分异味与色度物质,提升出水水质。例如,处理化工废水中的难降解有机物时,采用高级氧化技术分解有机物后,通过颗粒活性炭吸附去除残留有机物与氧化副产物,再通过超滤膜过滤去除微小颗粒与胶体,使出水COD浓度降至50mg/L以下,满足回用要求。联合工艺的组合顺序与参数需根据废水水质特点、处理目标及经济性要求优化设计,确保各环节协同高效,避免处理工序冗余或效果叠加不足。如处理含油废水时,可采用气浮物理分离与化学破乳结合的方式,先通过化学破乳剂破坏乳化体系,使

乳化油转化为浮油,再通过气浮技术去除浮油与乳化油,破乳剂投加量与气浮参数需精准匹配,提升油类去除效率;处理含重金属与有机物的复合废水时,可采用化学沉淀去除重金属,再通过活性炭吸附去除有机物,或先通过物理吸附去除有机物,再通过化学沉淀去除重金属,根据污染物特性确定最优组合顺序。

物理—化学联合处理工艺能够充分发挥两类技术的优势,弥补单一技术的不足,提升对复杂废水的处理能力与出水水质,拓展废水处理技术的应用场景,为高难度废水处理提供高效、稳定的解决方案。同时,通过优化组合工艺与运行参数,可有效降低处理成本与能耗,减少二次污染风险,推动废水处理技术向高效化、环保化方向发展。

(二) 生物—化学耦合处理体系

生物—化学耦合处理体系通过将生物处理技术的环保性、低成本优势与化学处理技术的高效性、针对性优势有机结合,利用生物降解与化学反应的协同作用,实现污染物的分阶段、高效去除,提升处理效率与经济性,减少药剂消耗与二次污染风险,适用于中高浓度有机废水、含难降解污染物废水及复合污染物废水处理,是兼顾环保与高效的废水处理模式。

生物降解与化学沉淀的阶段组合设计可优化处理流程,降低处理成本,提升处理效果。通常采用生物处理为前置阶段,通过微生物代谢降解大部分有机污染物,降低废水有机物浓度,减少后续化学处理的药剂投加量,同时微生物代谢产物可调节废水水质,为化学沉淀创造有利条件。后续通过化学沉淀去除残留的重金属、磷等污染物,确保出水达标。例如,处理畜禽养殖废水时,先通过厌氧生物处理降解高浓度有机物,产生沼气实现能源回收,再通过好氧生物处理进一步降解有机物,降低COD与氨氮浓度,最后投加石灰、聚合氯化铝等药剂进行化学沉淀,去除残留的磷与重金属,同时调节出水pH值,使出水满足排放要求。这种组合模式可减少化学药剂投加量30%~50%,显著降低处理成本。对于含难降解有机物的废水,可采用化学预处理与生物处理结合的模式,通过化学氧化技术如臭氧氧化、芬顿氧化等将难降解有机物转化为易生物降解的小分子物质如有机酸、醇类等,提升废水的可生化性,再通过生物处理技术如活性污泥法、生物膜法等实现有机物的深度降解,确保出水达标。例如,处理印染废水时,先采用臭氧氧化预处理,将难降解的染料分子分解为易生物降解的小分子物质,B/C比从0.2提升至0.4以上,再通过生物接触氧化池处理,降解有机物,出水COD与色度均能

稳定达标。微生物代谢产物对化学处理效果的促进效应可进一步提升耦合效果，微生物代谢产生的有机酸、酶、EPS等物质可调节废水pH值至化学处理的适宜范围，增强化学药剂的活性，促进污染物沉淀或分解，提升化学处理效率。例如，微生物代谢产生的有机酸可降低废水pH值，增强芬顿反应中羟基自由基的生成量，提升氧化分解效率；微生物产生的酶可催化部分化学反应，加快污染物转化速率。耦合体系的运行需控制好各阶段的衔接参数，如生物处理后的水质指标、化学药剂投加量、反应时间、pH值等，确保生物处理与化学处理的协同稳定，避免生物处理效果波动影响化学处理效率，或化学药剂残留抑制微生物活性。例如，在化学预处理后，需调节废水pH值、去除残留氧化剂，再进入生物处理系统，避免氧化剂对微生物造成抑制；生物处理后需控制废水浊度与有机物浓度，确保化学沉淀效果稳定。

生物—化学耦合处理体系兼顾了环保性与高效性，能够有效降低处理成本与二次污染风险，提升废水处理的深度与广度，推动废水处理技术向绿色化、高效化方向发展。同时，这种耦合模式可根据废水水质特点灵活调整组合工艺，适配不同类型废水的处理需求，为中高难度废水处理提供可靠的技术方案，助力实现水资源循环利用与生态环境改善的目标。

七、废水处理技术应用场景适配性分析

（一）工业废水处理场景的技术选择

工业废水成分复杂、污染物浓度高、毒性强、水质波动大，不同行业废水的水质特点、污染物类型与浓度差异较大，如化工废水富含难降解有机物与重金属，电镀废水富含重金属与氰化物，食品加工废水富含高浓度有机物，印染废水富含染料与色度物质。因此，需根据废水类型、水质特点、处理目标、经济性要求及环保政策，选择适配的处理技术与工艺组合，确保处理效果达标，同时兼顾经济性与环保性，实现技术与场景的精准匹配，提升处理效率与综合效益。

重金属废水处理中化学沉淀与离子交换的适用性较强，可根据废水重金属浓度、处理精度及资源回收需求选择适配工艺。化学沉淀技术通过投加沉淀剂如石灰、碳酸钠、硫化钠等与重金属离子反应生成难溶性沉淀物如氢氧化物、碳酸盐、硫化物等，再通过沉淀分离去除重金属，适用于处理高浓度重金属废水如电镀废水、矿山废水，重金属浓度通常在10mg/L ~ 100mg/L，处理成本较低，操作简

单，处理后重金属浓度可降至1mg/L以下，但会产生较多污泥，污泥需进行无害化处理。离子交换技术通过离子交换树脂吸附重金属离子，树脂表面的可交换离子与废水中的重金属离子发生交换反应，实现重金属去除，适用于低浓度重金属废水处理如电子工业废水，重金属浓度在0.1mg/L ~ 10mg/L，处理精度高，可将重金属浓度降至0.01mg/L以下，同时可实现重金属的回收利用，如回收铜、镍、铬等贵金属，提升资源利用率，但离子交换树脂存在再生频繁、成本较高的问题，适用于对处理精度与资源回收要求较高的场景。高浓度有机废水处理中厌氧生物技术与高级氧化的匹配度较高，可实现有机物高效降解与能源回收。厌氧生物技术可在无氧条件下分解高浓度有机物，产生沼气实现能源回收，适用于废水预处理阶段，处理有机物浓度在10000mg/L ~ 50000mg/L的高浓度有机废水如畜禽养殖废水、食品加工废水、酿酒废水，处理过程无需曝气，能耗低，还可实现能源自给，但处理周期较长，受温度影响较大。高级氧化技术如芬顿氧化、臭氧氧化、光催化氧化等可高效分解难降解有机物，适用于后续深度处理，将有机物浓度从1000mg/L ~ 5000mg/L降至50mg/L以下，确保出水达标，但其运行成本较高，需控制氧化剂投加量与反应条件。对于化工、印染等行业的复杂工业废水，单一技术或简单组合技术难以实现达标处理，需采用多技术组合模式，如物理预处理+化学氧化+生物处理的联合工艺，实现污染物的分阶段去除。例如，处理化工复合废水时，先通过格栅、沉淀等物理预处理去除悬浮颗粒，再通过臭氧氧化预处理提升废水可生化性，随后通过厌氧—好氧生物处理降解有机物，最后通过化学沉淀去除重金属与磷，确保出水达标；处理印染废水时，采用物理过滤+化学破乳脱色+生物处理+深度过滤的组合工艺，实现色度、有机物、悬浮物的同步去除。

工业废水处理场景的精准技术选择能够提升处理效率与经济性，减少资源浪费与二次污染，推动工业企业实现绿色生产，助力行业可持续发展。同时，需结合企业生产工艺特点，优化废水处理工艺与生产工艺的协同衔接，从源头减少废水产生与污染物排放，实现废水减量化、无害化与资源化的多重目标。

（二）生活污水处理场景的技术整合

生活污水具有有机物浓度适中、成分相对稳定、水量波动较小的特点，主要污染物包括有机物、氮、磷、悬浮物、细菌等，处理核心目标是去除有机物、氮、磷等污染物，实现达标排放或中水回用，满足城市绿化、道路冲洗、

景观补给等回用需求。因此,需通过技术整合,将不同处理技术有机结合,提升处理效率、出水水质与资源化利用率,适配生活污水处理的规模化、常态化与资源化需求,同时兼顾运行成本与维护便利性。

生物处理工艺与膜分离技术的耦合应用是生活污水处理的主流模式,能够实现有机物降解与深度净化的同步进行,提升出水水质,满足中水回用要求。生物处理工艺通过活性污泥法、生物膜法、SBR等工艺降解有机物与氮磷,将大部分有机物转化为无害物质,降低COD、氨氮、总磷浓度;膜分离技术通过超滤、纳滤等实现固液分离与深度净化,去除微小颗粒、胶体、细菌、病毒及部分溶解性物质,提升出水水质。例如,将膜生物反应器(MBR)应用于生活污水处理,生物反应器内的活性污泥降解有机物与氮磷,膜组件实现固液分离,出水水质优良,COD浓度可降至30mg/L以下,氨氮浓度降至5mg/L以下,悬浮物浓度接近零,出水可直接用于绿化灌溉、道路冲洗等;对于要求更高的回用场景如景观补给、工业冷却,可在MBR处理后增加纳滤处理,进一步去除溶解性盐类与小分子有机物,提升出水水质。消毒环节中化学药剂与紫外辐射的协同效果可提升消毒效率,减少消毒副产物产生,确保出水卫生安全,满足回用与排放的卫生要求。通常采用化学药剂消毒为主、紫外辐射消毒为辅的模式,化学药剂如次氯酸钠、二氧化氯等具有消毒速度快、效果稳定的优势,可快速杀灭废水中的细菌、病毒等微生物;紫外辐射消毒具有无二次污染、操作简单的优势,可进一步去除残留微生物与消毒副产物,弥补化学消毒的不足。例如,生活污水处理后,先投加次氯酸钠消毒,控制有效氯浓度在5mg/L~10mg/L,消毒时间为30min,杀灭大部分微生物,再通过紫外辐射消毒,波长控制在254nm,照射时间为10s~20s,去除残留微生物与消毒副产物,确保出水细菌总数符合国家标准。生活污水处理技术整合需要兼顾规模化运行与成本控制,选用能耗低、操作简单、维护方便的工艺组合,提升处理系统的稳定性与经济性。对于大型城市污水处理厂,可采用活性污泥法+二沉池+深度过滤+消毒的组合工艺,处理量大,运行稳定,成本较低;对于中小型污水处理站或分散式污水处理场景,可采用SBR+超滤+消毒的组合工艺,结

构简单,操作灵活,占地面积小;对于水资源短缺地区,可采用生物处理+膜分离+回用系统的组合工艺,提升中水回用率,实现水资源循环利用。此外,还可整合污泥处理技术,将生物处理产生的剩余污泥通过厌氧消化产生沼气,实现能源回收,污泥消化后经脱水、干化处理,可用于堆肥或无害化处置,提升污泥资源化利用率。

生活污水处理场景的技术整合能够提升处理效率与出水水质,推动中水回用,实现水资源循环利用,减少对新鲜水资源的依赖,缓解城市水资源短缺压力,同时减少污水排放对生态环境的影响,助力生态城市建设与可持续发展。通过持续优化技术组合与运行参数,可进一步降低处理成本与能耗,提升资源化利用水平,实现生活污水处理的高质量发展。

八、结束语

废水处理技术作为环境工程的核心组成,在保障水资源可持续利用与维护生态安全中具有不可替代的战略地位。随着环境治理需求的日益提升,进一步系统推进物理、化学、生物技术的综合优化与协同应用,已成为行业升级与生态建设的必由之路。未来,科研机构与工程企业应当积极整合新型过滤材料研发、高效絮凝剂筛选与催化剂复配、微生物菌种选育与反应器结构改进等关键技术优化策略,并深化物理—化学联合与生物—化学耦合等组合模式的场景适配,构建涵盖水质、经济、环境的多维度评估体系。通过技术创新与实践应用的深度融合,不仅能显著提升废水处理的效率与资源化水平,还将为实现水资源循环利用、推动减污降碳协同增效提供坚实支撑,最终助力生态环境的持续改善与绿色低碳发展目标的全面达成。

参考文献:

- [1] 刘淑方.环境工程治理中废水处理技术的优化与应用研究[J].生态学与可持续发展研究,2025,2(01):55-57.
- [2] 郑建杰,沈俊杰.工业废水处理装置中的废气治理措施[J].生态学与可持续发展研究,2025,2(02):88-90.
- [3] 赵建军.环境工程中废水处理技术的优化与应用研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(11):22-24.
- [4] 潘涛,骆坚平,郭行.废水处理及回用工程技术手册[M].北京:化学工业出版社:202401:940.