

高排放标准污水处理厂尾水再生利用工程实践

杨浩飞

江苏中电创新环境科技有限公司 江苏 无锡 214111

【摘要】：高排放标准污水处理厂尾水作为潜在的再生水资源，其再生利用对于缓解水资源短缺、改善水生态环境具有重要意义。本文从尾水水质特征分析入手，系统探讨了尾水再生利用的核心处理工艺、关键技术参数优化及水质安全保障体系，深入剖析了不同回用场景下的工艺适配性，结合工程实践中的技术难点提出解决方案，为高排放标准尾水再生利用的工程化应用提供技术支撑和实践参考。

【关键词】：高排放标准；污水处理厂尾水；再生利用；处理工艺；水质安全

DOI:10.12417/2811-0528.25.19.070

引言

随着我国水环境治理标准的不断提升，污水处理厂出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级A标准及以上的比例逐年提高。

尾水再生利用将处理后的尾水作为工业用水、市政杂用、生态补水等替代水源，可实现“污水-再生水-水资源”的循环闭环。据测算，一座日处理10万吨的高排放标准污水处理厂，其尾水再生利用率若达到50%，年可节约新鲜水资源1825万吨，相当于30万人口城市的年生活用水量[1]。因此，开展高排放标准尾水再生利用工程实践研究，对推动水资源可持续利用和海绵城市建设具有重要的现实意义。

1 高排放标准尾水水质特征分析

1.1 常规污染物残留特征

一级A标准尾水中，COD浓度通常在30-50mg/L，其中可生物降解部分（BOD₅）占比不足30%，主要为溶解性微生物代谢产物（SMPs）；氨氮经深度脱氮处理后多以硝酸盐形式存在，浓度2-5mg/L；总磷经化学沉淀或生物除磷后，残留磷以可溶性磷酸盐为主，浓度0.3-0.5mg/L；悬浮物（SS）浓度≤10mg/L，但含有大量胶体态物质，粒径多在0.1-1μm之间。

1.2 微量污染物组成

尾水中含有多种微量有机污染物，包括药物和个人护理品，如抗生素（阿莫西林、红霉素）、雌激素（雌二醇）、防晒霜成分（氧苯酮）等，浓度多在ng/L至μg/L级，具有潜在内分泌干扰作用；内分泌干扰物如双酚A、邻苯二甲酸酯等，主要来源于工业废水和生活污水，在尾水中检出率超过80%；微量重金属如铜、锌、铅等，浓度一般在5-50μg/L，主要以络合态或颗粒吸附态存在，常规处理工艺难以完全去除。

1.3 微生物风险因子

尾水中仍残留一定量的病原微生物，包括细菌（如大肠杆菌、沙门氏菌）、病毒（如诺如病毒、腺病毒）和原生动物（如隐孢子虫）。一级A标准要求大肠杆菌≤10⁴个/L，但病毒和寄生虫的去除尚未纳入常规监测指标，对再生水的安全回用构成潜在威胁。

2 高排放标准污水处理厂尾水再生利用工艺工程实践

根据回用场景对水质的要求，高排放标准尾水再生处理工艺可分为深度处理和超深度处理两个层级，需针对不同污染物特性选择适配技术。

2.1 深度处理工艺

2.1.1 “混凝沉淀-过滤”工艺

通过投加聚合氯化铝（PAC）或聚合硫酸铁（PFS）等混凝剂（投加量20-50mg/L），使胶体颗粒脱稳凝聚，经沉淀池（表面负荷1.0-1.5m³/(m²·h)）去除后，再通过石英砂滤池（流速8-10m/h）或活性炭滤池进一步净化。该工艺可将SS降至5mg/L以下，COD去除率15%-25%，总磷降至0.2mg/L以下，运行成本较低（0.3-0.5元/吨水）。

2.1.2 膜生物反应器（MBR）深度处理

在传统MBR基础上，通过延长污泥龄（SRT30-50d）和优化曝气方式，强化对微量有机物的降解。膜组件采用孔径0.1μm的中空纤维膜，操作压力0.05-0.1MPa，可截留99%以上的悬浮物和病原微生物，出水浊度≤0.5NTU，COD≤30mg/L。但膜污染问题仍未完全解决，需定期进行物理清洗（每周1-2次）和化学清洗（每月1次），运行成本较高。

2.2 超深度处理工艺

2.2.1 臭氧-生物活性炭工艺

臭氧投加量 5-15mg/L，接触时间 15-30min，可氧化分解部分难降解有机物（如苯系物、农药），提高其生物可降解性；后续生物活性炭滤池（空床接触时间 15-20min）利用活性炭的吸附作用和附着微生物的降解作用，进一步去除 COD 和 DOC（溶解性有机碳），总 COD 去除率可达 40%-50%，对 PPCPs 的去除率超过 60%。该工艺的关键是控制臭氧尾气浓度（≤0.1mg/L），避免二次污染。

2.2.2 高级氧化技术

针对顽固微量有机物，采用 UV/H₂O₂、Fenton、电催化氧化等技术。UV/H₂O₂ 工艺中，H₂O₂ 投加量 50-100mg/L，UV 剂量 1000-2000mJ/cm²，可有效降解双酚 A、抗生素等物质，去除率达 80%-90%；Fenton 工艺通过 Fe²⁺（20-50mg/L）与 H₂O₂（100-200mg/L）反应生成羟基自由基（·OH），在 pH3.0-3.5 条件下，对 EDCs 的去除率超过 95%，但需后续中和处理（pH 调至 6-7）并去除铁泥。

2.2.3 纳滤/反渗透工艺

纳滤膜（截留分子量 200-1000Da）可有效去除重金属离子（如铜、锌去除率 90%以上）、消毒副产物前体物和部分有机物，操作压力 0.5-1.0MPa，产水率 75%-85%；反渗透膜（截留分子量<100Da）能去除几乎所有溶解性污染物，产水电阻率可达 10-15MΩ·cm，适用于高纯度工业用水，但浓水处理（占比 15%-25%）是工程应用的难点，需采用蒸发结晶或固化处理[2]。

3 高排放标准污水处理厂尾水再生利用工程实践案例

作为“一泓清水入黄河”战略的关键工程，该污水处理厂历经两期建设，逐步提升尾水处理效果与再生利用水平，实现了从达标排放到资源循环的跨越。

3.1 一期工程（达标处理阶段）

一期工程聚焦工业废水的集中达标处理，针对园区内化工、焦化等 70 余家企业排放的混合废水（含高浓度有机物、重金属及难降解污染物），构建了七重工艺组合系统，确保出水达到地表水 V 类标准。

核心工艺单元及参数：

表 1 一期工程主要工艺单元参数

工艺单元	关键参数	设计指标
------	------	------

进水调节池	有效容积 8000m ³ ，停留时间 8h	水力停留时间满足水质水量均化需求
A ² /O 生物处理	厌氧段 DO≤0.2mg/L，缺氧段 DO 0.2-0.5mg/L，好氧段 DO 2-3mg/L，污泥龄 15-20d	COD 去除率≥85%，氨氮去除率≥90%
芬顿处理	H ₂ O ₂ 投加量 50-80mg/L，Fe ²⁺ 投加量 20-40mg/L，pH 3.0-3.5，反应时间 60min	难降解 COD 去除率≥40%
生物曝气滤池	滤料层高 3m，气水比 3:1，空床停留时间 45min	进一步去除 SS 及残余有机物，SS≤10mg/L
臭氧强氧化	臭氧投加量 15-20mg/L，接触时间 30min，尾气浓度≤0.1mg/L	对苯系物、杂环化合物等去除率≥60%

3.2 二期中水回用项目（零排放阶段）

随着《山西省黄河流域污水综合排放标准》进一步收紧，2023 年启动二期中水回用项目，投资 2.05 亿元，以一期出水为水源，通过深度脱盐与资源回收工艺，实现工业废水“零排放”，膜处理产水回用于园区企业生产，浓水经分盐结晶后回收工业盐。

表 2 二期工程主要工艺单元参数

工艺单元	关键参数	设计指标
预处理	多介质过滤器滤速 8m/h，保安过滤器精度 5μm，SDI≤3	保障后续膜系统稳定运行
两级反渗透	一级操作压力 1.2-1.5MPa，二级操作压力 1.0-1.2MPa，总回收率 75%	产水电阻率≥10MΩ·cm
浓水预处理	pH 调节至 8.0-8.5，投加阻垢剂 2-3mg/L	防止浓水在纳滤系统中结垢
两级纳滤分盐	操作压力 0.8-1.0MPa，截留分子量 200-300Da	一价盐透过率≥90%，二价盐截留率≥95%

蒸发结晶	三效蒸发温度 60-80℃，结晶器固液比 30%	氯化钠纯度≥98%，可作为工业用盐
------	--------------------------	-------------------

表 3 二期工程进水及产水水质指标（单位：mg/L）

指标	一期出水（进水）	反渗透产水	蒸发结晶盐纯度	回用标准
总溶解固体（TDS）	1500-2000	≤50	-	≤100（工业循环水）
硬度（以CaCO ₃ 计）	300-500	≤5	-	≤50
氯离子	800-1200	≤10	氯化钠≥98%	≤200
COD	30-40	≤5	-	≤10

运行效益	-	年回用水量 120 万吨，节约新鲜水成本约 600 万元	年回收工业盐 5000 吨，产值约 800 万元	-
------	---	------------------------------	--------------------------	---

通过二期项目的实施，不仅实现了工业废水“零排放”，还形成了“废水处理-中水回用-盐资源回收”的闭环产业链，带动了膜组件维护、危废处置等配套产业发展，新增就业岗位 120 余个，为工业园区绿色低碳发展提供了可复制的实践模式。

4 结论

高排放标准污水处理厂尾水再生利用是水资源循环利用的重要途径，其技术核心在于根据回用场景选择适配的深度处理或超深度处理工艺，通过参数优化和运行调控实现污染物高效去除。未来发展可结合人工智能算法，实现工艺参数的自适应调节和故障预判，提高系统运行稳定性；从尾水中回收氮、磷等营养物质，制成缓释肥料，实现“污水处理-资源回收-循环利用”的闭环系统。通过技术创新和工程实践的不断深化，高排放标准尾水必将成为缓解水资源短缺的重要支撑，为水生态文明建设提供有力保障。

参考文献：

[1] 余步存.高排放标准污水处理厂尾水再生利用工程实践[J].市政技术,2025,43(06):263-270.

[2] 王裕创.城镇污水处理厂尾水再生利用方式及处理技术探究[J].生态与资源,2024,(11):96-98.

[3] 王策.上海城镇污水处理厂尾水再生利用潜力分析[J].净水技术,2023,42(06):103-111.