

典型工业集聚区如化工尾水深度处理技术优化与水质达标机制研究

周小静

南阳市生态环境局镇平分局 河南 南阳 474250

摘要：随着我国工业化进程的加速，以化工园区为代表的典型工业集聚区已成为区域经济增长的重要引擎。然而，其产生的高浓度、难降解、成分复杂的化工尾水对区域水环境安全构成了严峻挑战。传统的污水处理工艺在面对此类尾水时，往往难以稳定实现严格的排放标准。本文聚焦于典型化工集聚区尾水深度处理的核心难题，系统梳理了当前主流的深度处理技术（包括高级氧化、膜分离、吸附及生物强化等）的原理、适用性及局限性。在此基础上，通过构建“源头-过程-末端”协同的系统性思维框架，深入探讨了技术优化路径，并创新性地提出了一个集“精准诊断-智能调控-风险预警-长效管理”于一体的水质达标保障机制。研究表明，单一技术路线难以应对化工尾水的复杂性，必须通过多技术耦合集成、智能化运行控制以及全生命周期的管理体系，才能实现水质的稳定达标与资源化利用，为化工园区的绿色、可持续发展提供科学支撑。

关键词：工业集聚区；化工尾水；深度处理；技术优化；水质达标；机制研究

引言

工业集聚促产业发展，化工园区作为典型形式，借产业链整合与资源共享提升经济效益，却也引发集中式环境污染，水污染问题尤为突出。化工生产原料多、工艺复杂，尾水污染物浓度高、毒性大、可生化性差、水质水量波动大，含大量难降解有机物及特征污染物。近年来，国家对水环境质量要求趋严，相关标准相继出台，指标限值不断收窄。许多园区现有的“预处理+生化处理”二级模式难满足新要求，出水不稳定、超标排放频发，威胁受纳水体生态安全与公众健康。因此，化工尾水深度处理、稳定达标排放，成为化工园区可持续发展关键瓶颈与环境工程重大课题。本研究旨在分析其技术瓶颈，探索优化路径，构建水质达标保障机制，对推动化工行业绿色转型、保障国家水生态安全意义重大。

1 典型化工尾水水质特征与深度处理难点

1.1 水质特征分析

化工集聚区水质普遍呈现出高度复杂且动态变化的特征。（1）高盐分：TDS（总溶解固体）通常在5000-20000mg/L，甚至更高，抑制微生物活性，影响后续生化及膜处理效果。（2）高COD与低B/C比：COD浓度范围广（500-3000mg/L），但B/C比普遍低于0.2，表明大部分有机物为难生物降解物质。（3）成分复杂且毒性未知：除常规污染物外，还含有多种微量有毒有害有机物，其种类和浓度随企业生产工况动态变化，形成“特征污染指纹”。（4）水质水量波动大：不同企业、不同生

产线的排水规律不一，导致园区总排口水质水量极不稳定，给处理系统带来巨大冲击负荷。

1.2 深度处理核心难点

基于上述水质特征，化工尾水深度处理面临三大核心难点：（1）难降解有机物的有效矿化：传统生化法对此类物质几乎无效，需要依赖强氧化能力的高级氧化技术，但存在药剂消耗大、运行成本高、可能产生毒性更大的中间产物等问题。（2）高盐分与膜污染的协同控制：高盐分会加剧膜污染，缩短膜寿命，增加清洗频率和成本^[1]。同时，浓缩液的处置成为新的难题。（3）水质波动下的系统稳定性：进水水质的不确定性要求处理系统具备强大的抗冲击负荷能力和自适应调节能力，这对工艺设计和运行管理提出了极高要求。

2 主流深度处理技术评述与优化路径

2.1 主流技术原理与适用性分析

目前应用于化工尾水深度处理的主流技术主要包括高级氧化、膜分离、吸附及生物强化等几大类。高级氧化技术（AOPs）通过产生强氧化性的羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）无选择性地攻击并分解有机污染物，其中Fenton及其衍生技术对含酚、苯胺类废水具有较好效果，但存在产泥量大、pH适用范围窄等缺陷；臭氧氧化兼具脱色、消毒与氧化功能，但单独使用时对部分顽固有机物矿化不彻底，而引入催化剂形成的臭氧催化氧化工艺则能显著提升 $\cdot\text{OH}$ 产率和氧化效率，成为当前研究与应用热点；电化学氧化技术通过阳极直接氧化或间

接生成氧化剂实现污染物降解,易于自动化控制,但能耗偏高限制了其大规模应用。膜分离技术则利用物理筛分或选择性透过原理实现污染物截留,超滤(UF)和微滤(MF)主要用于去除悬浮物和胶体,常作为反渗透(RO)的预处理单元;纳滤(NF)和反渗透(RO)则能高效截留二价离子、小分子有机物及盐分,是实现水质深度净化和高品质再生水回用的关键,但其应用始终受制于严重的膜污染和高盐浓缩液处置难题。吸附技术利用活性炭、树脂等多孔材料的表面作用去除色度、臭味及特定有机物,效果显著但吸附剂饱和后需再生或处置,长期运行成本较高。生物强化技术试图通过投加特种菌种或构建MBR等特殊反应器提升系统对难降解物的处理能力,但在高盐、高毒的实际尾水环境中,其效能往往大打折扣。

2.2 技术优化路径:从单一到耦合集成

针对单一技术的局限性,多技术耦合集成是优化的核心方向。通过优势互补,形成“1+1>2”的协同效应。

2.2.1 “高级氧化-生物”耦合模式

“高级氧化-生物”耦合是当前最具经济性与可持续性的优化路径之一。该模式的核心思想在于利用高级氧化技术(如臭氧催化氧化、Fenton氧化等)作为生化处理的预处理单元,将原水中结构复杂、毒性高、可生化性差的大分子有机物(如芳香族化合物、杂环类物质)部分氧化裂解为分子量更小、毒性更低、且易于被微生物利用的中间产物,从而显著提升废水的B/C比。经此预处理后,尾水进入后续的生物处理单元(如移动床生物膜反应器MBBR、曝气生物滤池BAF或改良型A/O系统),可在较低能耗下实现有机物和氮素的高效矿化^[2]。这一耦合策略有效规避了单独使用高级氧化时药剂消耗大、运行成本高的弊端,同时也克服了传统生化系统对难降解有机物处理效率低下的瓶颈。更重要的是,由于进入生化系统的污染物毒性降低、可生化性提高,整个系统的运行稳定性与抗冲击负荷能力也得到显著增强,为出水水质的长期稳定达标提供了坚实保障。

2.2.2 “膜分离-高级氧化”耦合模式

“膜分离-高级氧化”耦合模式则更侧重于实现水质的深度净化与水资源的高品质回用,适用于对再生水水质要求较高的园区。该模式通常采用“超滤/微滤(UF/MF)-反渗透(RO)”作为主体深度处理单元,UF/MF有效去除悬浮物、胶体及部分大分子有机物,为RO提供合格的进水,保障其长期稳定运行;RO则凭借其极高的截留率,几乎完全去除溶解性盐分、小分子有机物及微量污染物,产出水质接近纯水的再生水,可直接回用于

锅炉补给水、工艺用水或高端冷却系统。然而,RO过程不可避免地会产生占进水15%~25%的高盐、高污染物浓度的浓缩液,若直接排放将造成新的环境问题。为此,该耦合模式的关键在于对RO浓水进行末端处置——引入电催化氧化、臭氧氧化或湿式氧化等高级氧化技术,对浓缩液中的残余有机物进行深度矿化,并结合蒸发结晶等手段实现盐分的资源化或安全处置,最终迈向“近零排放”目标。尽管该路径初期投资与能耗相对较高,但在水资源稀缺地区或对回用率有强制要求的园区中,具有不可替代的战略价值。

2.2.3 “吸附-高级氧化”协同再生模式

“吸附-高级氧化”协同再生模式是一种面向特征污染物精准治理的创新路径。该模式首先利用具有高选择性和大比表面积的吸附材料(如改性活性炭、大孔吸附树脂、分子印迹聚合物等)对尾水中的特定有毒有害特征污染物(如硝基苯、苯胺、卤代烃等)进行高效富集与分离,从而实现复杂混合污染物的“靶向捕获”。当吸附剂达到饱和后,传统做法是更换或送外再生,成本高昂且可能产生二次固废。而在该协同模式下,饱和吸附剂可在原位或旁路系统中通过温和的高级氧化条件(如低剂量臭氧、紫外/过氧化氢等)进行再生处理。氧化剂优先作用于吸附在材料孔道内的高浓度目标污染物,将其降解为小分子甚至矿化,从而恢复吸附剂的活性位点。这一过程不仅实现了吸附剂的循环利用,大幅降低运行成本,而且将污染物的降解限定在高浓度区域,提高了氧化剂的利用效率,减少了副产物生成风险。该模式特别适用于含有明确、高价值或高毒性特征污染物的化工尾水处理场景,体现了“精准治污、科学治污”的理念。

3 水质达标保障机制构建

3.1 “源头-过程-末端”协同治理机制

要实现化工尾水水质的长期稳定达标,必须超越单纯的末端工程技术思维,构建覆盖全链条的协同治理机制。在源头环节,应大力推行清洁生产审核,引导和激励企业采用无毒或低毒替代原料、优化合成路径、提升资源利用效率,从生产源头上减少污染物的产生量和毒性强度;同时,建立严格的企业排水水质在线监测与排污许可制度,明确排放限值,严禁超标、超总量排放行为。在过程环节,园区层面需建设完善的“一企一管、明管输送、实时监测”的污水收集管网系统,实现对企业排水的精准计量、实时监控与快速溯源;一旦发现某企业排水水质异常,系统可立即启动拦截或分流措施,对其进行厂内预处理,有效防止高浓度、高毒性废水对

公共污水处理厂造成冲击负荷^[3]。在末端环节，公共污水处理厂作为最后一道防线，必须配备经过充分论证和优化的深度处理集成工艺，并辅以严格的运行管理制度，确保无论进水如何波动，最终出水均能稳定满足最严格的排放标准。唯有将这三个环节有机衔接、形成闭环，才能从根本上破解化工尾水治理的困局。

3.2 “精准诊断-智能调控-风险预警”运行机制

在协同治理框架下，深度处理系统的高效稳定运行还需依托一套智能化的运行保障机制。首先，应建立基于高分辨质谱（HRMS）、三维荧光光谱（EEMs）等先进分析技术的水质指纹数据库，对进水中复杂多变的特征污染物进行快速识别、定性与半定量分析，为工艺参数的动态调整提供精准的科学依据，实现“因水施治”。其次，依托物联网（IoT）、大数据平台和人工智能（AI）算法，构建智慧水务控制系统。该系统能够实时采集进水水质、水量、关键设备运行状态等海量数据，通过内置的优化模型自动计算并调整臭氧投加量、双氧水与亚铁比例、膜系统运行压力与反洗周期、生化池曝气强度等核心运行参数，在保障出水水质的前提下，最大限度地实现节能降耗与延长设备寿命。最后，必须建立基于水质迁移转化模型的风险预警体系。当在线监测数据出现异常趋势或关键指标逼近预警阈值时，系统能提前数小时甚至数天发出风险警报，并自动或辅助人工启动应急预案，如切换至备用处理单元、临时加大药剂投加、降低处理负荷等，从而将超标风险扼杀在萌芽状态，确保排放口水质万无一失。

3.3 长效管理与政策保障机制

技术与运行机制的有效落地，离不开健全的长效管理与政策保障体系。首先，必须在法律和制度层面明确园区管理委员会、公共污水处理厂运营单位以及各排污企业三方的责任边界，建立“谁污染、谁治理、谁付费”的清晰责任追究与经济约束机制，杜绝推诿扯皮。其次，生态环境主管部门应加强对园区总排口和重点企业排口的监督性监测频次与力度，并将监测数据与企业

自行监测、在线监控数据进行交叉验证，确保数据的真实性与权威性，对数据造假或持续超标行为依法严惩^[4]。最后，政府应创新激励政策，对成功实施污水深度处理与高品质再生水回用、显著降低新鲜水取用量和污染物排放总量的园区及企业，给予财政补贴、税收减免、绿色信贷等实质性支持，激发市场主体的内生动力，推动环保从“被动合规”向“主动创绿”转变，形成良性循环。

4 结语

化工尾水因高盐、高毒等特性，单一处理技术难以稳定达标，需转向多技术耦合集成的系统性方案，“高级氧化+生物”“膜+高级氧化”两类耦合路径提供了优化方向。而水质长期稳定达标依赖超越技术本身的综合性保障机制，需融合全链条协同治理、智慧化运行管理以及长效政策与监管体系，形成闭环管理系统。面向未来，化工尾水深度处理研究与实践需多维度深化。技术上，开发新型非均相催化剂，突破高盐浓缩水资源化利用与近零排放技术瓶颈；智能化方面，推动人工智能等技术与水处理系统深度融合，构建“自动驾驶”式智慧水厂；评价体系上，引入全生命周期评价方法。唯有通过多轮驱动，才能破解治理难题，为化工产业可持续发展筑牢生态环保基石。

参考文献

- [1]杨恺钧,熊敏敏.长江经济带工业集聚对水环境污染的影响——基于空间计量与门槛效应的检验[J].资源与产业,2021,23(04):21-28.
- [2]罗小勇,彭文博,吴正雷,等.膜集成技术在化工尾水零排放中的中试研究[J].中国资源综合利用,2021,39(04):10-13.
- [3]隋秋萍,李玉超,侯国斌.绿色化学理念下化工废水处理技术创新研究[J].化工管理,2025,(30):45-47.
- [4]王冬.化工废水深度处理与达标排放关键技术探讨[J].华东纸业,2025,55(11):84-86.