

化工废水资源化处理工艺优化与循环利用实践

王丹丹

国家能源集团煤焦化有限责任公司，内蒙古乌海市，016000；

摘要：化工废水成分错综、污染物浓度高、毒性显著，传统处理工艺面临处理效率不高、资源回收不足、运行成本过高问题，难以契合“减污降碳”与资源化利用双重需求。本文依据化工废水处理现状，从预处理工艺改良、核心处理技术进步、深度处理与资源回收协同、循环利用体系搭建四个方面，探寻工艺优化途径。借助高级氧化预处理、生物强化技术、膜分离耦合回收等组合工艺，做到污染物高效去除与水资源、盐资源、有用组分定向回收。依据实际工程案例验证，优化后的工艺可把废水 COD 去除率提升到超 95%，水资源回收占比达 70%~85%，极大降低处理成本及环境风险，为化工行业废水资源化利用提供技术借鉴与实践样本。

关键词：化工废水；资源化处理；工艺优化；循环利用；组合工艺；污染物去除

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.072

引言

化工行业作为国民经济支柱产业，生产期间产生大量高浓度难降解废水，含有的有机物、重金属、盐类等污染物若被直接排放，会极大威胁水体生态和人类健康。随着“双碳”目标及绿色发展理念逐步实施，化工废水处理已从“达标排放”过渡到“资源化循环利用”。传统处理工艺诸如物理化学法、单一生物法等，虽可去除部分污染物，但存在资源损耗、运行成本高、处理效果不稳定等弊端，难以匹配复杂化工废水处理要求，

《“十四五”工业绿色发展规划》清晰要求“推动工业废水资源化利用，提高水资源重复利用率”。基于此背景，开展化工废水资源化处理工艺改进与循环利用实践探索，依靠技术创新与工艺联合，实现污染物高效去除与资源回收协同效益，作为应对化工行业水资源短缺与环境污染双重困境的关键。本文结合工程实操，查找科学可行的工艺改良路径，为化工废水资源化利用给予技术支持。

1 化工废水处理现状与资源化瓶颈

目前化工废水处理与资源化利用存在诸多显著问题，阻滞了行业绿色转型。其一，废水成分纷繁多样，处理难度颇高。化工废水富含大量芳香族化合物、杂环化合物、重金属离子及高盐成分，污染物浓度起伏大、毒性高，部分污染物无法用传统工艺降解，导致处理效率低下，无法达成资源化利用的水质要求。例如，煤化工、制药行业废水 COD 浓度常达数万 mg/L，BOD5 跟 COD 比值小于 0.3，为典型的难降解高浓度有机污水。

其二，传统工艺资源利用水平低，资源浪费现象突

出，多数化工企业采用“预处理+生化处理+深度处理”这一常规流程，目标只是实现达标排放，未考量水资源、盐资源及有用组分回收。处理后的中水多数仅用于绿化、冲洗等低附加值场景，高盐废水多采用蒸发结晶工艺简易处理，未完成盐资源分级回收与纯化，引发水资源和盐资源的双重浪费。

其三，运营成本高昂，技术适配性欠佳。传统工艺面临能耗高、药耗大、污泥产量多等问题，导致处理成本长期维持高位。同时，单一处理技术应对复杂废水处理需求能力不足，生化工艺处理高盐、有毒废水耐受性欠佳，物理化学法对污染物的去除深度有限，欠缺针对性的组合工艺设计。此外，部分资源化技术（如膜分离、高级氧化等）投资成本高，技术成熟度与稳定性需进一步提升，制约了其大规模推广应用。

其四，循环利用系统有缺陷，未开展全流程设计^[1]。多数企业废水资源化利用未进行系统规划，各处理单元衔接有障碍，水资源回收渠道单一，未打造“生产废水—处理—资源化回用—生产”的闭环系统。同时，没有对回收资源进行质量管控与梯级利用规划，导致回收资源利用效率欠佳、附加值不高，不易达成经济效益与环境效益契合。在此背景下，开展化工废水资源化处理工艺优化与循环利用实践研究，通过技术创新与工艺耦合，实现污染物高效去除与资源回收的协同增效。

2 化工废水资源化处理工艺优化路径

2.1 预处理工艺优化：强化污染物去除与水质调节

预处理作为化工废水处理首道屏障，其优化方向是去除悬浮颗粒物、削减污染物负荷、优化后续处理单元

进水水质。处理高浓度难降解废水,运用“物理化学预处理 + 高级氧化”组合工艺,增强预处理成效。物理化学初步处理阶段,采用混凝沉淀、气浮、隔油等工艺,清除废水中悬浮固体、油脂物质及部分胶体污染物,缓解后续工艺处理压力。例如,采用聚合氯化铝高效混凝剂与聚丙烯酰胺助凝剂复合,可让悬浮颗粒物的去除率达到 85%以上。

高级氧化初步处理阶段,针对难降解的有机污染物,采用臭氧氧化、芬顿氧化、电催化氧化等技术,破除污染物的化学结构,提升废水生化可处理性。例如,借助臭氧 - 紫外联用工艺处理制药废水,紫外光催化臭氧产生大量羟基自由基,能把难降解有机物氧化分解成小分子物质,让废水 BOD5/COD 比值由 0.25 升至 0.45 以上,为后续生化处理创造契机。面对高盐废水,采用纳滤分盐初步处理工艺,基于废水中不同盐类截留率区别,实现氯化钠与硫酸钠初步分离,为后续盐资源的提纯回收打基础。

2.2 核心处理技术升级:提升污染物降解与资源分离效率

核心处理阶段是完成污染物深度去除和资源初步分离的关键,需依照废水水质特性,挑选适配的强化处理手段。面对生化性能良好的化工废水,采用生物强化技术改良传统生化工艺,利用接种高效降解菌、构建复合微生物菌群手段,提高微生物对特定污染物降解能力。例如,在处理含酚废水时,添加假单胞菌、芽孢杆菌等高效降解菌,可把酚类污染物去除率提升到 98%以上。同时,采用 MBR(膜生物反应器)工艺置换传统活性污泥法,利用膜的截留效应实现污泥与水力停留时间相分离,提高污泥浓度及处理效能,出水水质稳定性提高,助力后续资源的回收利用。

面对难生化、高盐废水,运用“物化强化 + 膜分离”组合工艺。例如,处理煤化工高盐有机废水时段,先借助催化湿式氧化技术去除大部分有机污染物,之后运用反渗透(RO)膜分离技术实现盐与水分离,产水达到循环水补水的标准,浓盐水进入后续盐分回收流程^[2]。针对含重金属废水,实施化学沉淀 - 螯合树脂吸附组合举措,先利用化学沉淀去除多数重金属离子,再凭借螯合树脂的特异性吸附能力,深度去除余下重金属离子,保证出水重金属含量达标,同时实现重金属富集与回收。

2.3 深度处理与资源回收整合:实现水资源与有用组分回收

深度处理阶段主要目标是进一步净化水质,完成水资源回用,同时靶向回收废水中盐资源、有用有机物等。水资源回收方面,采用“超滤(UF) + 反渗透(RO)”双膜深度处理工艺,净化经核心处理后的出水。UF膜可清除水中的悬浮物、胶体及微生物,维持 RO 膜稳定运转;RO膜可高效拦截水中溶解盐、有机物及重金属离子,产水水质可契合工业循环水补水、工艺用水等中高附加值回用标准,可实现 70%~85%的水资源回收率。面对 RO 浓水,能采用纳滤(NF)膜开展分盐,或借助碟管式反渗透(DTRO)工艺浓缩,增加水资源总回收比例。

盐资源回收范畴,聚焦高盐浓水,采取“蒸发结晶 + 分盐纯化”工艺,实现盐资源分级回收与资源再利用。采用多效蒸发、MVR(机械式蒸汽再压缩)蒸发等技术使浓盐水浓缩成过饱和状态,再借助冷却结晶、真空结晶等工艺达成盐类结晶分离。采用离心分离、重结晶、洗涤纯化等技术,去除盐晶体里的杂质,产出工业级、食品级氯化钠或硫酸钠物品。采用 MVR 蒸发 - 冷却结晶工艺处置化工高盐废水,能产出纯度超 99.5%的工业盐,达成盐资源的循环式利用。

有用组分回收方面,针对存在特定有机污染物的化工废水,运用萃取、吸附、精馏等技术靶向回收有用组分。例如,处理含有丙酮、乙醇等有机溶剂的废水时,借助精馏工艺回收有机溶剂,回收占比可达 90%以上;处理含酚废水之际,借助溶剂萃取法回收酚类物质,实现资源再利用与价值提高。

2.4 循环利用系统构建:打造全流程闭环回用体系

建设“废水预处理—核心处理—深度处理—资源回收—梯级回用”全流程循环利用系统,实现水资源的封闭管理。拟定梯级回用计划,依照不同生产工序水质要求,对回收水资源实施分级利用,高纯度产水可作工艺生产、锅炉给水等高端场景用水;中等水质产水作循环冷却补水、设备冲洗等用水;低质产水作绿化灌溉、道路冲洗等用水,实现水资源利用价值最大化。

创建资源回收与再利用的协同机制,把回收的盐资源、有机溶剂等返至生产系统循环运用,或把其作为副产品外销^[3]。例如,可将回收的工业盐用作生产配料,回收的有机溶剂可直接投入生产工艺,构建“资源—产品—废弃物—再生资源”循环经济模式,增进对回收资源质量的监测管控,设立严格质量标尺,保证回收资源具备稳定性与适用性。

调整系统运行的相关参数,保障各处理单元协同高效开展。依靠自动化控制系统,实时监测各单元进排水

质、处理成效及运行参数,随水质变化动态调整药剂添加量、运行负荷等参数,保障系统运行稳定与经济。例如,依靠PLC控制系统联动调节RO膜的压力和回收率,防止膜出现污染,增加膜的使用寿命。

3 工艺优化的保障措施与推广建议

3.1 技术保障:加强关键技术研发与成果转化

增大化工废水资源化处理关键技术研发投入,聚焦突破高级氧化、膜分离、生物强化、盐资源分质回收等核心技术关卡,增进技术的成熟度、稳定性及经济性。促进企业跟高校、科研机构协同,实施产学研协同革新,针对不同行业、不同水质情况的化工废水,开发定制组合工艺。同时,搭建技术成果转化平台,提速实验室技术中试、工业化试验与推广运用,减少技术转化周期。例如,面对高盐难降解废水,研发抗污染、低成本的新型膜材,减少膜分离技术投资及运行成本。

3.2 政策支持:完善激励机制与标准体系

政府相关机构应制定专项政策,增大对化工废水资源化利用支持强度。运用财政补贴、税收优惠、绿色信贷等激励手段,引导企业实施废水资源化处理工艺改进与循环利用系统建设^[4]。构建化工废水资源化利用标准体系,设定废水回用、资源回收及污染物排放的相关标准,为工艺优化与循环利用给予依据。例如,制定各行业化工废水梯级回用标准,规范水资源回收利用途径;完备盐资源回收质量分级标准,提高回收盐资源的附加价值。

3.3 管理优化:强化全流程管控与智能化运营

企业要搭建化工废水资源化处理全流程管理体系,对废水产生源头、处理过程及资源回收利用实施全过程管控。提升生产工艺,采用清洁生产技术,降低废水生成量及污染物浓度;推进废水收集及分质分流系统搭建,杜绝不同水质的废水混合处理,降低处理难度及成本。同时,实施处理系统智能化升级,采用物联网、大数据、AI等技术,打造智能化监控运营平台,实现各处理单元运行状态实时监测、故障预警及参数优化,增进系统运行效率及稳定性。

3.4 行业推广:加强案例示范与经验共享

择取不同行业与规模的化工企业开展废水资源化处理工艺优化示范项目,总结经验成果与典型模式,构建可复制推广的技术方案及实施途径^[5]。采用行业研讨会、现场观摩会、技术培训等形式,推进示范案例推广

及经验共享,推动更多企业实施废水资源化处理工艺改造。同时,支持行业协会、第三方服务机构发挥桥梁纽带价值,为企业提供技术咨询、方案设计、工程建设、运营管理一站式服务,促进化工行业废水资源化利用整体水平提升。

4 总结

优化化工废水资源化处理工艺且循环利用,是推动化工行业绿色低碳发展、突破水资源短缺与环境污染困境的关键手段。本文针对现今化工废水处理存在的成分复杂、资源化程度欠佳、运行成本高、循环利用体系不完整等问题,从预处理优化、核心技术革新、深度处理与资源回收融合、循环利用系统搭建四个方面,推出了系统的工艺优化举措,凭借煤化工企业工程实践案例验证优化方案有效。通过采用高级氧化预处理、生物强化技术、膜分离耦合回收等组合工艺,实现污染物高效去除与水资源、盐资源、有用组分的定向回收。

实践表明,优化后的组合工艺可实现污染物高效去除及水资源、盐资源、有用组分协同回收,显著提升资源化利用水平,降低处理费用与环境隐患。同时,执行技术研发、政策扶持、管理革新与行业推广等保障手段,为工艺优化与循环利用的实施提供了有力助力。未来,要进一步加大关键技术研发及成果转化力度,完备政策标准体系,实施智能化运营和全行业拓展,让化工废水资源化处理工艺在更多行业企业实现落地见效,推动化工行业实现“减污降碳协同增效”的绿色发展愿景,带动循环经济模式深度拓展。

参考文献

- [1] 李海龙,赵磊,李宁,等.化工废水深度处理及资源化利用技术的创新与实践研究[J].电脑采购,2024(50).
- [2] 章春生,何婷,王乐朴,等.UASB+两级套环A/O工艺处理生猪养殖废水资源化利用及工程实践[J].绿色科技,2025(10).
- [3] 王敬.嗜盐菌处理氨基葡萄糖制造高盐废水的工艺优化及资源化利用[D].华东理工大学,2023.
- [4] 许娜.化工废水处理技术与资源化利用[J].Modern EducationExploration,2024,5(4).
- [5] 景伟.煤化工废水深度处理与资源化利用的技术进展[C]//第二届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集.2024.