

工业废水处理与资源化利用技术实践探索

杨青霖

赣州市南康区空间规划设计院有限公司 江西 赣州 341400

【摘要】：工业废水成分复杂、污染物浓度高，随意排放易造成水资源短缺与生态环境破坏。本文结合当前工业废水处理行业现状，系统梳理物理化学、生物处理及新型高级氧化等核心处理技术，通过典型行业实践案例分析资源化利用路径，剖析技术应用中的现存问题，提出针对性优化策略，为工业废水减量化、无害化、资源化发展提供参考，助力工业绿色低碳转型。

【关键词】：工业废水；处理技术；资源化利用；实践应用；绿色转型

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.018

1 引言

随着工业生产规模扩大与产业结构升级，废水排放量持续攀升，其中含有的重金属、有机物、酸碱物质等污染物，对水体生态系统和人类健康构成严重威胁。我国水资源总量丰富但人均占有量低，工业用水缺口逐年扩大，将废水处理后实现资源化再利用，既是破解水资源困境的关键举措，也是践行“双碳”目标、推动工业高质量发展的必然要求。近年来，废水处理技术不断迭代升级，从传统达标排放向资源化回收转型成为行业趋势，但在技术适配性、成本控制、产业化推广等方面仍面临挑战，亟需通过实践探索形成可复制、可推广的模式。

2 工业废水处理核心技术分类及应用

工业废水处理技术依据原理可分为物理化学处理法、生物处理法及新型高级氧化法，不同技术的适用场景、处理效果及资源化潜力存在差异，需结合废水水质特性合理选用。

2.1 物理化学处理技术

物理化学技术凭借处理效率高、操作便捷的优势，广泛应用于高浓度、难降解工业废水预处理或深度处理环节，部分技术可同步实现资源回收。沉淀法通过添加絮凝剂、助凝剂，使废水中的悬浮颗粒、胶体物质及重金属离子形成沉淀物分离，适用于冶金、化工废水的重金属去除。某冶金企业采用化学沉淀法处理含铅废水，投加氢氧化钙调节 pH 值至 9.5-10.5，搭配聚合氯化铝絮凝剂，铅离子去除率达 99.2%，沉淀污泥经脱水处理后可回收铅资源。膜分离技术基于膜的选择性透过性，实现废水组分的分离与提纯，包括超滤、纳滤、反渗透等。其中反渗透技术在废水资源化中应用最广，可将处理后的废水转化为工业回用水。某电子企业采用超滤+反渗透双膜工艺处理生产废水，出水水质达到电子级用水标准，回水率达 75%，年节约新鲜水用量 120 万吨。吸附法利用活性炭、沸石、新型纳米吸附材料等的吸附性能，去除废水中的有机物、重金属离子。新型多孔纳米吸附材料因比表面积大、吸附容量高，逐渐替代传统吸附剂。某化工企业采用改性纳米二氧化钛吸附剂处理含酚废水，酚类物质去除率达 98.5%，吸附剂经脱附再生后可重复使用，降低处理成本。

2.2 生物处理技术

生物处理技术借助微生物的代谢作用，将废水中的有机污染物分解为无害的水、二氧化碳等物质，具有成本低、二次污染少的特点，适用于有机污染物含量高的工业废水。

活性污泥法是传统生物处理技术的代表，通过曝气培养活性污泥中的微生物群落，降解废水中的有机物。该技术工艺成熟、处理量大，广泛应用于食品加工、印染等行业。某食品加工企业采用活性污泥法处理废水，进水 COD 浓度为 3000-5000mg/L，出水 COD 浓度降至 50mg/L 以下，符合污水综合排放标准。

生物膜法通过在载体表面形成生物膜，强化微生物与污染物的接触反应，包括生物滤池、生物转盘、膜生物反应器(MBR)等。MBR 技术结合了生物处理与膜分离的优势，处理效果稳定，出水水质优良。某印染企业采用 MBR 工艺处理印染废水，COD 去除率达 92%，色度去除率达 95%，处理后废水部分回用于染色工序，资源化效益显著。

厌氧生物处理技术适用于高浓度有机废水，在无氧条件下通过厌氧菌代谢将有机物转化为甲烷等可燃气体，实现能源回收。某造纸企业采用厌氧消化+好氧处理组合工艺，处理制浆废水，厌氧阶段产生的甲烷经收集净化后用于锅炉燃烧，年节约燃煤成本 80 万元，同时 COD 去除率达 90%以上。

2.3 新型高级氧化技术

针对难降解、有毒有害工业废水，传统处理技术难以达到理想效果，新型高级氧化技术通过产生强氧化性自由基，将污染物彻底矿化或转化为易降解物质，成为废水深度处理的重要方向。

芬顿氧化法利用亚铁离子与过氧化氢反应生成羟基自由基，氧化分解废水中的难降解有机物，适用于制药、化工等行业废水处理。某制药企业采用芬顿氧化法预处理含抗生素废水，COD 去除率达 65%，后续搭配生物处理工艺，实现废水达标排放与部分回用。

光催化氧化技术以半导体材料为催化剂，在光照条件下产生自由基降解污染物，具有反应条件温和、无二次污染的优势。

新型光催化材料的研发与应用，进一步提升了技术处理效率，某农药企业采用改性二氧化钛光催化氧化技术处理废水，有机磷去除率达 93%，处理后废水可用于农田灌溉。

臭氧氧化法通过臭氧的强氧化性破坏污染物分子结构，实现脱色、除臭与有机物降解，常作为废水深度处理环节。某化工园区采用臭氧氧化+活性炭吸附组合工艺，对生化处理后的废水进行深度处理，出水水质达到循环用水标准，回用水率提升至 60%。

3 工业废水资源化利用典型实践案例

不同行业工业废水水质差异较大，资源化利用路径各具特色。以下结合化工、印染、食品加工三大典型行业，分析废水处理与资源化利用的实践方案及成效。

3.1 化工行业废水资源化实践

化工废水成分复杂，含多种有机溶剂、重金属及有毒有机物，资源化潜力大但处理难度高。某精细化工企业针对生产过程中产生的含甲醇废水，采用精馏+反渗透组合工艺，先通过精馏回收废水中的甲醇，回收率达 95%，回收的甲醇可作为生产原料重复使用；精馏后废水经反渗透处理，产水回用于生产冷却用水，浓水经蒸发结晶回收盐资源，实现废水全组分资源化利用。该方案实施后，企业年减少废水排放量 8 万吨，回收甲醇 1200 吨，节约原料成本 300 万元，废水处理成本降低 40%。

3.2 印染行业废水资源化实践

印染废水具有色度高、COD 浓度高、水质波动大的特点，传统处理以达标排放为主，资源化利用率低。某印染企业采用分质分流+深度处理+回用工艺，将印染废水分为染色废水、印花废水、洗涤废水，分别进行预处理：染色废水经混凝沉淀+臭氧脱色处理，印花废水经超滤去除悬浮物，洗涤废水直接进入生物处理系统；后续采用纳滤膜分离技术，回收废水中的染料与盐类，回收的染料可用于低档面料染色，盐类回用于染色固色工序；处理后清水回用于车间洗涤，回用水率达 70%。该项目运行后，企业年减少新鲜水用量 150 万吨，回收染料 80 吨、盐资源 200 吨，年节约成本 500 万元，同时减少污染物排放，实现环境效益与经济效益双赢。

3.3 食品加工行业废水资源化实践

食品加工废水富含蛋白质、糖类、油脂等有机物质，易生物降解，资源化方向以能源回收与农田灌溉为主。某乳制品企业采用厌氧消化+好氧处理+农田灌溉工艺，废水先进入厌氧消化池产生沼气，沼气经净化后用于发电，年发电量达 200 万度，满足企业 15% 的用电需求；厌氧消化后的废水经好氧处理，COD、BOD5 去除率分别达 95%、98%，出水符合农田灌溉水质标准，用于周边农田灌溉，年灌溉面积达 2000 亩，实现废水资源化与农业资源化结合。为直观对比不同行业废水资源化利用成效，整理关键指标如下表所示：

表 1 关键指标

行业类型	核心处理工艺	资源化方向	回用水率	年经济效益（万元）
精细化工	精馏+反渗透+蒸发结晶	甲醇回收、中水回用、盐资源回收	65%	300
印染	分质分流+臭氧脱色+纳滤	染料回收、盐回收、生产回用	70%	500
乳制品	厌氧消化+好氧处理	沼气发电、农田灌溉	50%	200（发电收益）

注：表中数据来源于各企业实际运行统计，因生产规模、水质差异，数据仅供参考。

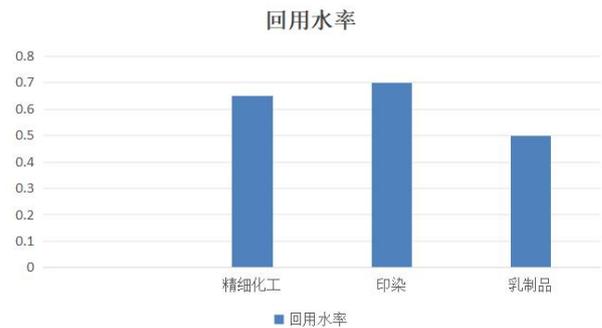


图 1 回用水率

4 工业废水处理与资源化利用现存问题

4.1 技术适配性不足

部分企业盲目选用先进技术，未结合自身废水水质、处理规模及资源化需求进行适配设计，导致处理效果不佳、运行不稳定。例如，部分中小企业采用成本较高的膜分离技术处理低浓度废水，不仅增加投资成本，还因水质波动导致膜污染严重，缩短膜使用寿命，反而降低处理效率。此外，针对复杂组分工业废水，单一处理技术难以实现达标排放与资源化回收，组合工艺的优化集成不足，制约资源化效益发挥。

4.2 成本压力较大

废水处理与资源化设备前期投资较高，尤其是新型高级氧化技术、膜分离技术的设备与耗材价格昂贵，中小企业难以承担。同时，设备运行过程中需消耗大量电能、药剂，后续维护保养成本也较高，部分企业因成本压力，被迫降低处理标准或放弃资源化利用，仅满足基本达标排放要求。此外，资源化产品市场价格波动较大，部分回收资源附加值低，难以覆盖处理

成本,影响企业资源化积极性。

4.3 政策支撑与监管体系不完善

虽然我国出台多项政策推动工业废水资源化利用,但部分政策针对性不足,缺乏对不同行业、不同规模企业的差异化扶持措施。例如,补贴政策多向大型企业倾斜,中小企业难以享受同等优惠。同时,废水资源化利用的标准体系不健全,部分回收产品的质量标准、用途规范不明确,制约回收产品的市场流通。此外,部分地区环境监管力度不足,存在企业偷排漏排、超标排放等现象,破坏市场公平,影响合规企业开展资源化利用的积极性。

4.4 技术研发与产业化衔接不足

我国在废水处理与资源化领域的基础研究取得一定进展,但部分新型技术仍停留在实验室阶段,缺乏中试及工业化应用验证,技术成熟度不足。同时,科研机构与企业之间的合作机制不完善,科研成果难以快速转化为实际生产力,导致先进技术与工业实践脱节。此外,行业内技术交流与共享不足,企业之间难以借鉴成功经验,制约整体技术水平提升。

5 工业废水处理与资源化利用优化策略

5.1 优化技术适配设计,推广组合工艺

企业应结合自身废水水质特性、处理规模、资源化目标及成本预算,进行针对性技术选型,避免盲目跟风。对于复杂组分废水,推广多技术组合工艺,实现优势互补。例如,高浓度有机废水可采用厌氧消化+好氧处理+高级氧化组合工艺,既实现有机物降解,又回收沼气能源;含重金属废水可采用化学沉淀+吸附+膜分离组合工艺,提高重金属去除率与回收效率。同时,加强组合工艺的优化集成,简化流程、降低能耗,提升处理与资源化效率。

5.2 强化成本控制,提升资源化效益

政府应加大对中小企业的扶持力度,通过财政补贴、税收减免、低息贷款等方式,降低企业设备投资与运行成本。企业应加强生产过程管控,推行清洁生产,从源头减少废水排放量与污染物浓度,降低处理压力。同时,优化设备运行参数,提高药剂利用率、降低能耗,加强设备维护保养,延长设备使用

寿命。此外,挖掘回收资源的附加值,开发高价值资源化产品,拓展市场渠道,通过规模化回收降低单位处理成本,提升经济效益。

5.3 完善政策支撑与监管体系

政府应出台差异化扶持政策,加大对中小企业废水资源化利用的支持力度,完善补贴标准与申请流程,确保政策落地见效。同时,加快健全废水资源化利用标准体系,明确回收产品的质量标准、用途规范及检测方法,畅通回收产品市场流通渠道。强化环境监管,加大对偷排漏排、超标排放企业的处罚力度,建立健全长效监管机制,营造公平竞争的市场环境。此外,加强政策宣传引导,提高企业环保意识与资源化理念,推动企业主动开展废水资源化利用。

5.4 加强产学研融合,推动技术产业化

搭建科研机构与企业之间的合作平台,建立产学研协同创新机制,鼓励企业参与科研项目研发,推动科研成果从实验室走向工业化应用。加大对中试基地的投入,为新型技术提供中试验证条件,提升技术成熟度与稳定性。加强行业技术交流与共享,搭建技术交流平台,推广成功实践案例,促进企业之间相互借鉴学习。同时,鼓励企业加大研发投入,开展自主创新,优化现有技术与工艺,开发低成本、高效率、广适配的废水处理与资源化技术。

6 结论

工业废水处理与资源化利用是破解水资源短缺、推动工业绿色低碳转型的重要途径。当前,物理化学、生物处理、新型高级氧化等技术已在各行业得到广泛应用,通过分质分流、组合工艺优化等方式,实现了废水达标排放与资源回收的双重目标。但在技术适配、成本控制、政策支撑、产学研融合等方面仍存在诸多问题,制约行业发展。未来需结合不同行业废水特性,优化技术选型与组合工艺设计,强化成本控制与资源化效益提升;政府应完善政策支撑与监管体系,为企业提供差异化扶持与公平竞争环境;加强产学研融合,推动先进技术产业化应用。通过多方协同发力,不断提升工业废水处理与资源化利用水平,实现环境效益、经济效益与社会效益的统一,助力工业高质量发展。

参考文献:

- [1] 杨友麒.“双碳”形势下能源化工企业绿色低碳转型进展[J].现代化工,2023(01).
- [2] 冯前源;陈海杰;李飞;詹凌霄;陈恒;顾丽燕;杨林军.脱硫废水旋转喷雾蒸发特性数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2022(11).
- [3] 赵宁;冯永新;林廷坤;杨青山;谢志文.脱硫废水旋转喷雾蒸发与旁路烟道蒸发特性研究[J].中国电力,2022(07).
- [4] 陈海杰;李飞;杨树莹;谷小兵;车广民;杨林军.燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术比较[J].电力科技与环保,2022(03).