

低碳背景下工业废水处理系统节能优化与碳减排分析

董智国

河南钢铁集团安阳钢铁股份有限公司动力作业部 河南 安阳 455000

摘要:在双碳发展大背景下,工业废水处理高能耗、高碳排放问题愈发突出,传统处理模式难以实现减污降碳协同发展。本文依托低碳水处理与碳排放核算理论,系统分析工业废水处理系统运行现状与现存问题,精准核算全流程能耗与碳排放特征,剖析能耗与碳排放耦合矛盾。从设备、工艺、运维及资源回收维度制定节能优化方案,量化碳减排综合效益并开展可行性与风险分析,为工业水处理低碳提质增效提供可靠参考。

关键词:低碳背景;工业废水;处理系统;节能优化;碳减排

引言:当前我国工业绿色低碳转型持续推进,废水处理作为工业生产的重要耗能单元,绿色改造意义重大。现阶段多数工业废水处理系统存在设备匹配度低、工艺运行粗放、智能运维缺失等问题,无效能耗过高、碳排结构不合理,普遍存在治污与降碳难以兼顾的矛盾。基于此,本文围绕工业废水处理系统开展节能优化与碳减排研究,通过全流程管控优化,破解系统高耗高碳难题,助力工业领域双碳目标落地。

1 相关理论基础与系统现状分析

1.1 核心概念与理论基础

(1) 低碳水处理核心概念:本文聚焦工业废水处理场景,明确系统能耗为水处理全流程设备、药剂、运维等全部能源消耗总量;碳足迹是废水处理全过程直接与间接碳排放总和。同时界定节能优化为通过技术与管理手段降低系统无效能耗,减污降碳协同增效为实现污染物削减与碳排放降低的双向增益。(2) 碳循环与碳排放核算理论:工业水处理温室气体主要源于微生物分解、药剂反应、污泥降解等过程。核算理论明确系统核算边界,包含设备运行、药剂投加、污泥处置等环节,依托通用核算方法,量化各环节碳排放量,为降碳优化提供数据支撑。(3) 水处理系统节能优化理论:该理论以能效匹配、负荷调控为核心,通过匹配设备运行功率与处理负荷减少能耗损耗。同时结合水资源、污泥资源循环利用技术,搭配智慧运维调控手段,实现系统能耗与资源利用效率的整体优化。

1.2 工业废水处理系统构成与运行特征

(1) 系统核心组成:工业废水处理系统由预处理、生物处理、深度处理、污泥处置及配套机电设备构成,各模块逐级完成杂质去除、污染物降解、水质净化与污泥无害化处理,形成完整处理闭环。(2) 运行特点:工业废水水质波动大、污染物浓度高、处理负荷不稳定,

导致系统运行工况频繁变动,设备长期处于非额定工况,能耗波动幅度大、无效能耗占比偏高。(3) 能耗与碳排放来源:核心来源涵盖风机、水泵等机电设备运行能耗,混凝、消毒等药剂消耗碳排放,污泥处置过程能耗,以及水处理全过程微生物逃逸温室气体等^[1]。

1.3 工业废水处理系统现存问题分析

(1) 设备层面:老旧低效设备占比较高,设备选型与实际处理负荷匹配度差,风机、水泵等核心设备长期低效运行,能耗损耗问题突出。(2) 工艺层面:传统工艺流程冗余繁琐,曝气、加药环节多为粗放式运行,精准度不足。高碳传统工艺应用广泛,废水与污泥资源回收利用率低,能耗与碳排放偏高。(3) 运维层面:系统缺乏智能化实时调控手段,运维管理模式粗放,依赖人工经验操作,未建立标准化、常态化的节能降碳管控机制,整体节能降碳效果有限。

2 工业废水处理系统能耗与碳排放核算分析

2.1 核算边界与核算方法确定

(1) 核算边界界定:本文以工业废水处理完整运行链条为核心划定核算边界,覆盖废水进水预处理、主体工艺运行、水质深度净化、污泥浓缩处置、机电辅助系统运行等全流程环节。边界涵盖系统运行阶段所有能耗与碳排放行为,剔除基建、设备生产等上下游非运行周期内容,确保核算范围精准贴合水处理实际运营场景。

(2) 能耗核算方法:结合工业水处理行业规范,明确各类能耗核算统计标准。电力能耗以设备实时运行功率、时长为核心参数统计核算;药剂能耗依据水处理药剂投加总量及单位能耗系数计算;水资源、热能能耗结合进水用水量、工艺热能损耗及换热利用效率进行量化统计,实现全品类能耗规范化核算。(3) 碳排放核算方法:依托IPCC国际核算体系,结合国内工业废水处理行业碳排放核算标准开展测算。严格区分直接碳排放与间

接碳排放，直接碳排放为系统运行过程中自主产生的温室气体排放，间接碳排放为外购电力、药剂、资源消耗等外部环节衍生的碳排放，保障核算结果科学合规^[2]。

2.2 系统能耗现状核算与特征分析

(1) 各模块能耗统计：通过对水处理全模块能耗数据统计分析，分别核算预处理、生化处理、深度处理、污泥处置四大核心模块的能耗总量及占比。其中生化处理曝气、污泥处置脱水干化、水泵输水等环节为主要能耗单元，各模块能耗分布呈现明显差异化特征。(2) 关键能耗影响因素：系统能耗受多重因素协同影响，水质负荷波动会直接改变工艺处理负荷，大幅调整设备运行能耗；曝气强度、加药量等运行参数的粗放调控易造成无效能耗；设备老化、负荷匹配失衡会加剧能耗损耗；粗放的运维模式进一步放大系统整体能耗消耗。(3) 能耗短板总结：通过能耗数据对比分析，明确系统高能耗薄弱环节，核心集中在生化曝气系统、污泥处置设备及高频运行水泵、风机等设备模块。此类模块能耗利用率低、无效损耗量大，是后续系统节能优化、能耗管控的核心靶向单元。

2.3 系统碳排放核算与特征分析

(1) 直接碳排放核算：直接碳排放主要来源于生化处理环节，废水有机物在微生物分解作用下，会持续产生甲烷、氧化亚氮等温室气体，同时部分工艺反应过程会出现温室气体逃逸现象，通过行业通用测算公式可精准量化该部分直接碳排放量。(2) 间接碳排放核算：间接碳排放覆盖多个辅助环节，主要包含机电设备外购电力消耗产生的碳排放、水处理药剂生产与投加衍生碳排放、污泥外运处置及无害化处理碳排放、工艺水资源抽取与处理过程消耗的间接碳排放^[3]。(3) 碳排放分布特征：整体碳源分布呈现集中化特征，生化处理与电力消耗是核心碳排放单元，占系统总碳排放量比重最高。同时受水质、运行负荷波动影响，各环节碳排放存在阶段性波动，可据此识别精准减排的关键节点与管控时段。

2.4 能耗与碳排放耦合关系分析

(1) 能耗与碳排放相关性：工业废水处理系统能耗与碳排放存在显著正向耦合联动关系。系统设备运行能耗、药剂消耗的增加，会直接推动间接碳排放上升；而高负荷能耗运行工况，也会改变生化反应环境，加剧温室气体逃逸，提升直接碳排放总量。(2) 减污降碳协同矛盾点：传统水处理模式存在明显的协同矛盾，为保障水质达标，常采用过量曝气、超额加药等方式，虽提升污染物去除效果，但大幅增加能耗与碳排放；而单纯控制能耗、缩减药剂用量，又易导致出水水质不达标，难

以实现减污、节能、降碳的协同统一。

3 低碳背景下工业废水处理系统节能优化方案与碳减排效益分析

3.1 全流程节能优化方案设计

(1) 设备节能优化：针对工业废水处理系统老旧设备能耗高、效率低、负荷匹配失衡等问题，开展设备迭代与运行优化改造。全面淘汰高耗能、低精度的老旧水泵、风机及曝气装置，替换为高效节能型水处理专用设备，从硬件层面降低基础能耗。同时引入变频调控技术，根据进水水质、处理负荷的动态变化，实时调节设备运行频率与输出功率，改变传统设备恒速运行、过量做功的弊端，实现设备负荷与处理需求的精准匹配，有效减少设备无效能耗与机械损耗。(2) 工艺节能优化：依托现有水处理工艺流程，开展全工序工艺参数优化与流程精简。针对预处理筛分、沉淀、生化曝气、深度过滤等核心工序，结合水质波动规律调试最优运行参数，消除粗放式工艺运行带来的能源浪费。删减系统冗余处理环节，缩短水处理工艺流程，降低多工序叠加的能耗损耗。同时引入低碳高效水处理工艺，替代传统高碳、高能耗处理技术，在保障出水水质稳定达标的前提下，大幅降低工艺运行能耗与碳排放水平^[4]。(3) 运维节能优化：依托大数据与自动化技术搭建智慧水务智能管控系统，构建数字化、精细化低碳运维体系。通过传感器实时采集水质、设备工况、运行负荷等数据，实现曝气强度、药剂投加量、设备运行时长的智能化精准调控，杜绝人工经验式粗放操作。系统可根据生产负荷变化自动智能调峰，动态适配水处理运行工况，同时建立常态化节能降碳运维管理制度，规范设备巡检、工艺调试、日常管控流程，实现运维环节节能降耗常态化。

3.2 资源回收与能源利用优化

(1) 水资源循环利用：基于低碳资源化理念优化再生水回用工艺，完善废水深度处理与回用体系，提升工业废水资源化利用率。通过优化深度过滤、消毒、净化等回用工序参数，保障再生水水质稳定，可广泛应用于生产冷却、设备清洗、厂区绿化等场景，大幅减少工业新鲜水取用量。有效降低新鲜水资源开采、输送过程产生的间接能耗与碳排放，实现废水处理与水资源循环利用的双向低碳增益。(2) 污泥资源化低碳处置：摒弃传统污泥填埋、外运处置等高碳模式，采用厌氧消化、低温干化减量等绿色处置技术。通过厌氧消化工艺对污泥进行降解处理，回收反应产生的沼气，可作为辅助能源用于厂区供热、设备动力补给，实现能源回收利用。同时通过污泥干化减量技术大幅缩减污泥处置体量，降

低污泥外运、焚烧、填埋过程的能源消耗与温室气体排放,实现污泥减量化、资源化、低碳化处置。(3)余热回收利用:推广应用污水源热泵节能技术,充分回收工业废水水体蕴含的低温余热。利用废水水温稳定、余热储量大的特点,通过热泵系统提取水体热能,替代传统锅炉、电加热等高能耗设备,用于厂区生产供暖、设备保温、工艺水温调节等场景。有效降低传统热能供给模式的电力、热力消耗,减少化石能源消耗带来的碳排放,提升系统能源综合利用效率。

3.3 优化方案碳减排效益量化分析

(1)节能降耗效益:结合各模块优化改造方案,量化测算系统节能效益。设备优化、工艺精简与智能运维可有效降低水泵、风机、曝气等核心设备的电力消耗,减少药剂、水资源的无效损耗。通过对比优化前后各工序能耗数据,可明确各模块能耗降幅,统计系统整体节电、节水、节药总量,直观体现方案的节能降耗效果。

(2)碳减排量化效益:基于前文碳排放核算方法,对比优化前后系统直接与间接碳排放水平。工艺优化可减少生化环节温室气体逃逸,降低直接碳排放;设备节能、资源循环、余热利用可大幅降低电力、药剂、水资源消耗,显著削减间接碳排放。通过量化核算可得出系统年度碳减排总量,精准验证优化方案的降碳核心成效^[5]。

(3)综合协同效益:本次优化方案具备减污、节能、降碳、增效多重协同效益。工艺精细化调控可提升污染物去除效率,改善出水水质,实现减污增效;节能改造与资源回收可降低生产运行能耗成本,减少企业运维投入;碳排放量大幅削减可助力企业完成低碳指标,提升绿色生产水平,实现环境效益、经济效益与低碳效益的统一。

3.4 优化方案可行性与风险分析

(1)技术可行性:本次优化所采用的高效节能设备、低碳水处理工艺、智慧管控系统、污泥资源化技术均为行业成熟应用技术,适配工业废水复杂水质与运行工况。各类技术落地门槛低、适配性强,可与现有水处

理系统无缝衔接改造,无需大规模重构系统结构,具备良好的工业落地与技术推广可行性。(2)经济可行性:方案改造以设备迭代、工艺优化、系统升级为主,初期投入成本可控,无高额基建投入。长期来看,节能降耗、资源回收可持续降低企业电力、药剂、水资源采购及污泥处置成本,节能降碳收益可快速覆盖前期改造投入,投入产出比合理,具备良好的经济可行性与长期收益价值。(3)实施风险与应对:方案落地主要存在技术适配、运维转型、改造成本三类风险。针对设备工艺适配风险,改造前开展工况调研与技术适配测试;针对运维智能化转型风险,开展运维人员专项技能培训;针对成本波动风险,制定分阶段改造方案,合理规划资金投入,通过多元防控措施保障方案顺利落地实施。

结束语

本文全面梳理工业废水处理系统能耗与碳排放来源,明确高耗能、高碳排放关键环节,搭建了全流程、多维度的节能降碳优化体系。经分析可知,设备改造、工艺优化、智能运维与资源回收利用,可有效降低系统能耗与碳排放,实现减污、节能、增收多重协同效益。未来可结合智能监测与大数据技术持续优化运行模式,完善低碳运维体系,推动工业废水处理行业绿色低碳高质量发展。

参考文献

- [1]纪美辰,廖海清,陆志波.工业园区自建污水处理设施碳排放特征及减排策略[J].环境科学研究,2025,38(2):312-320.
- [2]刘阳,施周,文宇鸿.城镇污水系统碳核算方法研究及典型工艺减碳路径分析[J].给水排水,2024,50(1):37-45.
- [3]于金旗,孙磊,刘然彬.工业污水处理厂减污降碳关键技术与节能优化路径[J].水处理技术,2024,50(3):112-117.
- [4]王浩宇,李娟.工业废水处理系统能耗影响因素及节能改造优化策略[J].工业水处理,2023,43(8):201-206.
- [5]张磊,王佳宁.低碳目标下工业污水处理工艺升级与碳排放管控研究[J].环境工程,2022,40(9):89-94.