

城镇污水处理厂工艺优化与运行管理

蔡光宁

新疆北方建设集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 833200

摘要:随着我国城镇化进程的加速和生态文明建设的深入推进,城镇污水处理厂作为水环境治理的关键基础设施,其效能与管理水平直接关系到区域水生态安全与可持续发展。然而,面对日益严格的排放标准、复杂的进水水质波动、能源资源消耗巨大及运行成本高昂等多重挑战,传统的污水处理模式已难以为继。本文旨在系统探讨城镇污水处理厂在新时代背景下的工艺优化与运行管理策略。文章首先剖析了当前污水处理厂面临的主要困境,继而从工艺流程重构、关键单元强化、智慧化赋能及资源能源回收四个维度深入阐述了工艺优化的核心路径。在此基础上,重点论述了以精细化、标准化、智能化为核心的现代化运行管理体系构建。最后,对污水处理厂未来向“资源工厂”和“能源工厂”转型的发展趋势进行了展望,以期为提升我国城镇污水处理系统的整体效能、实现绿色低碳发展提供理论参考与实践指导。

关键词:城镇污水处理;工艺优化;运行管理;智慧水务;碳中和

引言

水是生命之源泉,亦是城市发展的命脉。改革开放以来,我国城镇污水处理事业取得了举世瞩目的成就,污水处理率和处理能力均实现了跨越式增长。然而,在取得显著成效的同时,行业也步入了新的发展阶段,面临着前所未有的复杂局面。一方面,《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)的修订预期以及地方更为严苛的标准(如北京、天津等地的地标),对出水水质,特别是氮、磷等营养盐指标提出了近乎“准IV类水”的要求。另一方面,随着工业废水偷排、合流制管网溢流等问题的凸显,污水处理厂进水水质呈现出高负荷、高毒性、高波动性的“三高”特征,给稳定达标运行带来了巨大压力。与此同时,传统污水处理厂被视为能源与资源的“消耗者”。据统计,污水处理行业的能耗约占全国总能耗的1%左右,且伴随着大量温室气体(如 N_2O 、 CH_4)的排放,与国家“双碳”战略目标相悖。此外,高昂的运行维护成本也给地方政府财政造成了沉重负担。在此背景下,如何通过科学的工艺优化与先进的运行管理,将污水处理厂从单纯的“污染治理终端”转变为集“污染削减、资源回收、能源自给、信息交互”于一体的“城市生态综合体”,已成为行业亟待解决的核心命题。

1 当前城镇污水处理厂面临的主要挑战

要有效实施工艺优化与运行管理,必须首先清晰认识并正视当前存在的主要问题与挑战。

1.1 进水水质水量的复杂性与不稳定性

许多城镇污水处理厂的设计进水水质基于理想化的市政生活污水模型,但现实中,由于工业废水混入、初

期雨水冲击、管网渗漏或地下水入侵等因素,导致进水水质成分异常复杂。例如,工业废水中可能含有抑制微生物活性的重金属、有毒有机物或高浓度盐分;雨季时,大量雨水稀释导致进水浓度骤降(C/N比失衡),而旱季则可能出现高浓度冲击负荷。这种强烈的波动性严重干扰了生物处理单元的稳定运行,极易造成出水超标。

1.2 出水水质标准日趋严格

环保要求的不断提高是行业发展的必然趋势。新标准不仅对COD、 BOD_5 、SS等常规指标限值收严,更对总氮(TN)、总磷(TP)乃至新兴污染物(如抗生素、内分泌干扰物)的去除提出了更高要求。传统的 A^2/O 及其变型工艺在应对低碳氮比(C/N)废水时,往往难以兼顾脱氮除磷效率,需要投加大量外碳源(如乙酸钠)或化学药剂(如PAC、PAM),这不仅增加了运行成本,也带来了二次污染的风险。

1.3 高能耗与高碳排放的双重压力

曝气系统是污水处理厂最大的能耗单元,通常占全厂电耗的50%-70%。过量曝气或供氧不足都会导致能效低下。此外,污泥处理处置环节(如浓缩、脱水、干化、焚烧)同样能耗巨大^[1]。在“双碳”目标约束下,污水处理厂的碳足迹核算与减排路径规划变得至关重要,传统的高能耗模式已不可持续。

1.4 运行管理模式粗放,依赖经验主义

部分污水处理厂仍停留在“看仪表、凭经验、勤巡检”的初级管理模式。缺乏对全流程数据的深度挖掘与分析,无法实现对工艺过程的精准调控。操作人员的技术水平参差不齐,面对突发工况(如污泥膨胀、硝化抑

制)时,往往反应滞后,处置措施不够科学,影响了整体运行的稳定性与经济性。

2 工艺优化的核心路径

针对上述挑战,工艺优化应着眼于系统性、前瞻性和经济性,从多个层面协同发力。

2.1 工艺流程的系统性重构与升级

工艺选择是优化的基石。应摒弃“一刀切”的思维,根据当地水质特点、排放要求、用地条件和经济承受能力,进行定制化设计。(1)主流厌氧氨氧化(Anammox)技术的应用:对于高氨氮、低碳氮比的污泥消化液或垃圾渗滤液,厌氧氨氧化技术展现出巨大优势。该工艺无需有机碳源,能耗仅为传统硝化反硝化工艺的25%,且污泥产量极低。虽然主流Anammox(直接处理市政污水)仍面临启动慢、菌群富集难等挑战,但其作为未来脱氮技术的重要方向,已在一些示范工程中取得进展。(2)多级AO/A²O-MBR/MBR组合工艺:对于用地紧张或出水要求极高的地区,膜生物反应器(MBR)凭借其高效的固液分离能力和优异的出水水质成为优选。通过将A²O与MBR结合,可以有效解决传统工艺二沉池占地大、污泥沉降性能差的问题。进一步,采用多级AO(Anaerobic-Anoxic-Oxic)配置,可以在单一反应器内形成多个缺氧/好氧环境,强化同步脱氮除磷效果,减少对外部碳源的依赖。(3)侧流磷回收与主流磷捕获:磷是不可再生资源。通过在厌氧段设置侧流,利用鸟粪石(Struvite)结晶法回收磷,不仅能减轻主流程除磷压力,还能生产高价值的缓释肥料。同时,在主流工艺前端投加金属盐(如铁盐、铝盐)进行磷的化学沉淀捕获,也是一种有效的强化除磷手段。

2.2 关键处理单元的精细化强化

在既有工艺框架下,对核心单元进行“微创新”和“精调优”,是成本效益较高的优化方式。曝气优化是节能降耗的重中之重,通过将好氧池划分为多个独立控制区,并根据各区溶解氧需求设定不同曝气强度,可以实现分区精确曝气;更进一步,利用在线氨氮、硝氮分析仪实时监测水质,PLC系统根据预设模型动态调整鼓风机频率和阀门开度,能够实现按需供氧,避免过度曝气;此外,用微孔曝气器替代穿孔管,用磁悬浮/空气悬浮离心鼓风机替代罗茨风机,也能显著提升氧传质效率和降低能耗^[2]。在碳源利用方面,可以通过设置初沉发酵池,将初沉污泥引入厌氧发酵池水解酸化产生挥发性脂肪酸(VFA),作为优质内碳源回流至反硝化段,大幅减少外购碳源;或者对剩余污泥进行碱性发酵,破解细胞壁释放胞内碳源;同时,通过优化进水点和混合液回流点的位置与比例,创造更有利的反硝化环境,也能提高原水

碳源的利用效率。为应对最严苛的出水标准,深度处理不可或缺,反硝化深床滤池兼具过滤、反硝化脱氮和除磷功能,是一种高效、紧凑的深度处理单元,而对于难降解有机物和新兴污染物,臭氧催化氧化、Fenton氧化等高级氧化技术可作为保障性措施,确保出水安全。

2.3 智慧化赋能:数据驱动的工艺决策

物联网、大数据、人工智能等技术的融合,正在深刻变革污水处理的运行范式。首先,需要在关键节点部署高精度、高可靠性的在线水质、水量、设备状态传感器,形成覆盖全厂的全面感知网络。在此基础上,基于机理模型(如ASM系列活性污泥模型)与数据驱动模型(如机器学习、深度学习)相结合,构建污水处理厂的数字孪生体,该模型能够实时映射物理工厂的运行状态,并对未来工况进行预测和模拟。最终,利用数字孪生模型,AI算法可以自动寻优最佳运行参数,并提前数小时甚至数天预警潜在风险,如污泥膨胀或硝化崩溃,从而指导操作人员主动干预,彻底改变“被动响应”的传统模式,实现“主动预防”的智慧化运行。

2.4 资源与能源回收:迈向“能源自给”

将废物视为资源,是实现可持续发展的必由之路。剩余污泥富含有机质,是潜在的能源载体,通过中温或高温厌氧消化,可将污泥中的有机物转化为沼气,沼气可用于发电或提纯为生物天然气,实现能源回收,消化后的沼渣经稳定化处理后可用于土地利用;对于有机质含量较低或土地利用受限的污泥,干化后焚烧可回收热能用于发电或供热,实现最大程度的减量化和能源化。除了化学能,城市污水水温常年保持相对稳定,蕴含巨大的热能,通过水源热泵技术,可为厂区建筑或周边社区提供供暖和制冷,其潜能远超化学能回收^[3]。此外,处理后的出水是宝贵的“第二水源”,根据用途进行分级处理和回用,不仅能缓解水资源短缺压力,还能创造经济效益。

3 现代化运行管理体系的构建

再先进的工艺,若缺乏科学的管理,也难以发挥其最大效能。现代化运行管理是连接工艺与效益的桥梁。

3.1 精细化管理:从宏观到微观

健全的绩效指标(KPI)体系是精细化管理的起点,需要建立涵盖水质、水量、能耗、药耗、泥量、设备完好率、成本等多个维度的KPI体系,通过KPI对标,持续发现短板,驱动改进。在此基础上,必须打破部门壁垒,对从进水到最终处置的每一个环节进行全流程成本核算,明确各项支出的构成,这有助于识别成本黑洞,为优化资源配置、制定精准的预算和考核方案提供坚实依据。同时,针对日常巡检、设备操作、维护保养、应急处置等

所有关键活动,制定详细、可执行的标准化作业程序(SOP),通过标准化来减少人为操作失误,确保运行的一致性和可靠性。

3.2 智能化管理平台:运行的“智慧大脑”

集成化中央控制系统(ICS)是智能化管理的核心,它将SCADA、视频监控、门禁安防、资产管理系统等集成于统一平台,实现“一张图”管控全厂。为了提升工作效率和响应速度,开发移动端APP使管理人员和一线员工能够随时随地查看运行数据、接收报警信息、执行工单任务、记录巡检结果,已成为现代化水厂的标配^[4]。更为前沿的是预测性维护(PdM)的应用,通过利用设备运行数据(振动、温度、电流等)和AI算法,可以预测关键设备的故障趋势,变“坏了再修”的事后维修为“该修才修”的预测性维护,从而有效降低非计划停机风险和维修成本。

3.3 专业化人才队伍建设

人是管理的核心要素,必须重视人才培养与激励。应定期组织工艺、自控、设备、安全等方面的持续培训,以提升员工的专业技能和对新技术的掌握能力。同时,建立厂内知识库,系统性地沉淀运行经验、故障案例和解决方案,可以有效避免因人员流动造成的知识断层。最后,将KPI考核结果与薪酬、晋升等挂钩的激励机制,能够激发员工的积极性和创造性,从而在全厂营造出一种追求卓越运营的文化氛围。

4 未来展望:从“污水处理厂”到“资源能源工厂”

未来的城镇污水处理厂,其角色定位将发生根本性转变。它不仅是净化水质的场所,更是生产再生水、回收磷氮等营养物质、产生清洁能源(电力、热能、生物燃气)、甚至吸收二氧化碳的“城市矿山”和“负碳工厂”。通过景观设计和生态修复,污水处理厂可以融入城

市绿地系统,成为市民休闲科普的生态公园,彻底改变其“邻避效应”的负面形象。在5G、边缘计算、数字孪生等技术的加持下,未来的水厂将实现高度自治,仅需少量人员进行监督和决策,运行效率和韧性将达到前所未有的高度。实现这一愿景,需要政策引导、技术创新、资本投入和公众认知的多方协同。政府应完善资源回收产品的市场准入和补贴政策;科研机构需攻克主流厌氧氨氧化、高效磷回收等关键技术瓶颈;企业要勇于投资和应用新技术;社会公众也应理解和支持污水处理厂的转型升级。

5 结语

城镇污水处理厂的工艺优化与运行管理是一项复杂的系统工程,涉及技术、管理、经济、政策等多个层面。面对新时代的挑战,我们不能再满足于“能处理、能达标”的基本要求,而应以更高的站位,推动污水处理厂向高效、低碳、智慧、资源化的方向深度转型。通过系统性工艺重构、关键单元精细化强化、智慧化技术深度赋能以及现代化管理体系的构建,不仅可以有效应对当前的运行困境,更能为实现国家“双碳”战略目标和建设美丽中国贡献关键力量。未来的污水处理厂,必将以其全新的面貌,成为支撑城市可持续发展的绿色基石和生态名片。

参考文献

- [1]丹丹.基于双碳目标的城镇污水处理厂工艺优化研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(03):6-8.
- [2]王瀚起.城镇污水处理厂扩容工程设计与工艺优化研究[J].现代工程科技,2025,4(16):9-12.
- [3]唐黎.城镇污水处理厂运行管理优化策略探究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(18):143-144+147.
- [4]张良文.小城镇污水处理站建设、运行管理存在的问题及对策[J].工程技术研究,2020,5(13):277-278.