

基于低碳目标的污水处理厂能耗控制与工艺优化研究

刘俊

天津临港胜科水务有限公司 天津 300456

摘要: 在低碳发展背景下, 污水处理厂的能耗问题已成为制约行业可持续发展的关键环节。研究围绕低碳目标展开, 从能耗控制与工艺优化双重路径进行探索。首先分析污水处理过程中曝气、污泥处理、泵送系统等高能耗环节的能耗特征; 其次引入先进控制策略和节能技术, 结合工艺优化措施, 实现系统整体能效提升; 最后评估优化措施对碳排放强度的削减效果。研究表明, 基于低碳目标的综合优化可有效降低运行能耗, 推动污水处理行业实现节能与减排的协同发展。

关键词: 低碳目标; 污水处理厂; 能耗控制; 工艺优化; 减排

引言

低碳战略的推进使污水处理行业面临新的挑战与机遇。作为城市基础设施的重要组成部分, 污水处理厂不仅承担污染治理任务, 还伴随高能耗与高排放的现实矛盾。传统运行模式在保障处理效率的同时, 往往忽视能源利用效率, 导致电力消耗与温室气体排放居高不下。随着节能减排目标的逐步强化, 如何在保证出水达标的前提下实现能耗控制与工艺优化, 成为亟须研究的核心问题。通过科学分析能耗结构并引入先进的工艺优化路径, 可以为污水处理厂运行提供新的技术思路, 同时也为实现低碳转型提供有力支撑。

1 污水处理厂能耗现状与低碳压力

污水处理厂作为城市水环境治理的核心设施, 其能耗水平一直处于较高状态, 主要集中在曝气系统、污泥浓缩与脱水环节以及水泵输送系统等单元操作过程中。曝气环节占总能耗的比例最大, 动力消耗通常在全厂能耗中接近一半, 鼓风机效率偏低、溶解氧控制不精准都会引起过度通气, 增加不必要的能源消耗。污泥处理单元涉及机械脱水、加药搅拌及加热干化等过程, 电力与热能的综合需求量较大, 若工艺路线单一, 则能源回收与再利用的潜力难以发挥。水泵系统在输送、提升和回流过程中由于扬程与流量匹配不合理, 也容易造成能耗偏高, 部分厂站仍使用效率不足的旧型机泵设备, 进一步拉大了能耗缺口。

低碳目标的提出使污水处理厂运行压力显著增加, 在实现出水达标的同时, 还需兼顾碳排放强度的降低。二氧化碳、氧化亚氮与甲烷的排放来源主要与能耗强度和工艺过程紧密相关, 传统运行模式忽视了温室气体的间接与直接排放问题, 导致整体碳排放水平偏高。在国家“双碳”目标背景下, 污水处理行业不仅要依赖电力消耗的削减, 还需通过工艺优化、能

源回收和过程管理实现能耗与排放的双重控制。因此, 能耗结构的解析和低碳压力地响应成为推动行业转型的必然要求。

2 高能耗环节的识别与影响分析

在污水处理厂的运行体系中, 高能耗环节的识别是进行能效提升和低碳改造的前提。大量实践表明, 曝气系统占据全厂电力消耗的主体地位, 其能耗比重通常维持在 40%~60% 之间。活性污泥工艺对溶解氧浓度要求较高, 而传统鼓风机在供氧效率和风量调控方面存在滞后, 常常导致曝气量过剩, 造成能量浪费。曝气池内微生物群落活性与供氧模式之间缺乏动态匹配, 使得部分能耗无法有效转化为生化反应所需的氧化能力, 从而放大了能耗与排放的矛盾。

在污泥处理环节, 能耗强度同样不容忽视。浓缩、消化、脱水以及干化工序涉及机械、电力和热能的复合消耗。机械脱水设备在长时间连续运行中功率稳定却效率偏低, 加药环节若剂量控制不精准, 会导致药剂利用率下降, 增加搅拌与分离所需的能耗。厌氧消化在具备能源回收潜力的同时, 也存在加热能耗与温度维持难题, 一旦热平衡设计不足, 额外的热能补偿就会显著提高整体能耗水平。

水泵与提升系统作为厂区运行的基础动力设备, 能耗占比也不可低估。不同水力工况下的流量与扬程匹配对能效水平有直接影响, 部分厂站仍使用老旧泵机组, 能效等级不达标, 导致无效电耗过高。回流污泥泵和提升泵运行频率缺乏精准调控, 在水量波动和进水负荷变化时易出现过度运转的现象, 使能耗进一步上升。

除此之外, 辅助系统的能耗也逐渐引起关注。包括在线监测设备、照明系统、空调通风及厂区自动化控制装置在内的辅助设施, 虽然单体能耗较低, 但在

长期运行中叠加形成的消耗不容忽略。特别是部分污水厂采用全天候在线监测与高频数据采集,导致传感器与控制系统处于持续高功率运行状态,增加了隐性能耗。

高能耗环节不仅体现在设备运行消耗,还与排放强度紧密相关。曝气系统能耗过高会引起氧化亚氮的非必要释放,厌氧消化过程若温度与负荷控制不当,会伴随甲烷泄漏,从而在能量消耗与温室气体排放之间形成叠加效应。能耗水平与碳排放强度的关联,使得污水处理厂在低碳背景下必须对高能耗环节进行全面识别与影响分析,为后续工艺优化与控制策略的提出奠定基础。

3 能耗控制的关键技术与策略

能耗控制在污水处理厂运行中具有核心地位,关键技术与策略的应用能够直接影响碳排放水平与能源利用效率。曝气系统的优化是节能的重点方向之一,通过采用变频鼓风机与高效微孔曝气装置,可以有效提升氧利用率并减少不必要的气量消耗。溶解氧的精准控制依赖于在线监测与自动化调节,结合先进过程控制(APC)技术与模糊控制算法,实现曝气强度与微生物代谢需求的实时匹配,从而减少能量浪费。部分污水厂已探索基于氨氮负荷和氧化还原电位的动态控制模式,使曝气系统不再依赖固定设定值,而是根据水质波动自动调节供氧,显著降低能耗强度。

在污泥处理环节,能耗控制技术也呈现多样化发展趋势。高效脱水机与低阻力滤布的应用减少了机械功率需求,药剂投加自动化系统通过实时监测污泥浓度与絮凝效果,能够避免药剂过量与搅拌负荷增加。厌氧消化过程中的能量回收是实现低碳目标的重要措施,利用沼气发电或锅炉供热,可以将废弃有机物转化为可再生能源,既降低外部电力依赖,也缓解加热能耗。为减少消化系统的额外热能消耗,部分厂站引入热交换与保温技术,通过热量回收与能量平衡设计,维持消化温度稳定,提高了整体能效水平。

水泵系统的节能改造同样是能耗控制的重点。高效泵机组替代老旧设备能够提高单位功率的输水效率,变频调速技术则使泵站运行更贴近实际水量需求,避免因负荷波动而产生的过度运转。通过智能监控平台实现流量、扬程与泵效率的综合调节,可以在保障处理工艺稳定的前提下减少无效电耗。部分先进厂区还通过水力优化设计,减少无效水头损失,使输送系统更加符合低碳运行目标。

辅助系统的能耗控制在整体优化中也不容忽视。

照明系统的节能改造普遍采用LED光源与分区智能控制,有效降低持续电耗。自动化监测设备在提高工艺稳定性的同时,应通过低功耗设计与间歇运行策略减少隐性能源消耗。空调与通风设备则需依靠余热利用、自然通风和节能控制模式实现电力消耗下降。随着信息化与智能化水平的提升,能源管理系统(EMS)的引入为全厂能耗控制提供了整体解决方案。通过对各环节的能耗数据进行实时采集、分析与反馈,管理者能够快速发现能效低下的单元并及时调整运行模式,实现系统化节能管理。

在工艺运行策略层面,优化排水水质与负荷分配是降低能耗的重要途径。分流处理与分段供氧策略能够缓解高峰时段能耗压力,使能源利用更为均衡。推流式与循环式工艺的结合可减少不必要的曝气时间,而强化生物除磷脱氮工艺则通过减少外加碳源与过度曝气降低整体能耗水平。通过能耗控制技术与运行策略的结合,污水处理厂能够在保持稳定处理效果的同时,有效降低能耗强度,实现与低碳目标的协调统一。

4 工艺优化路径与运行模式改进

污水处理厂的工艺优化路径与运行模式改进是实现低碳目标和能耗控制的重要手段,通过针对关键工艺环节的技术升级和系统调整,可显著提高能源利用效率。活性污泥法工艺在处理效率与能耗之间存在明显矛盾,通过改进反应池结构、调整回流比以及优化负荷分配,可以使溶解氧利用率和微生物代谢效率达到最佳匹配状态。间歇式操作模式和多段曝气技术的应用,有助于减少连续过曝气导致的能量浪费,同时维持氮、磷去除的稳定性。结合在线水质监测数据,动态调整曝气强度和曝曝时间,使工艺运行更加灵活,响应进水波动能力增强,从而降低整体能耗水平。

在污泥处理方面,工艺优化集中于脱水、厌氧消化和能量回收单元。脱水工艺可通过高效压滤机或带式压滤机替代传统离心机,结合药剂投加自动化和浓度实时监测,实现脱水效率提升与能耗降低。厌氧消化工艺的优化则依赖于温控精准化、负荷均衡以及沼气回收利用系统的完善,通过将产生的沼气用于热能或发电,减少对外部能源的依赖,同时降低碳排放强度。在高温消化和低温消化的组合应用中,热量平衡设计与隔热措施能够保持消化温度的稳定性,避免额外加热消耗,提升系统整体能效。水泵及循环系统的运行模式改进也是工艺优化的关键环节。变频调速技术使泵站可根据实际流量需求自动调节转速,避免负荷波动引起的无效能耗。管网布局优化和泵机组合调整可以降低水力损失,提升输送效率。回流污泥与循环水

流量的科学分配,不仅满足工艺需求,也避免了泵站不必要的长时间运转。在大型污水厂中,泵站与曝气系统的联动控制能够根据实时负荷和水质变化协调运行,使各单元能耗实现动态平衡。

辅助系统与自动化平台的工艺优化亦不可忽视。智能化能源管理系统可对全厂各单元的电力、热能及水力消耗进行实时监测、分析与优化调整,为运行模式改进提供数据支撑。照明、空调及通风系统通过节能设计和智能调控,实现低功耗运行,同时配合过程自动化控制系统,使操作人员能够基于数据决策对各环节进行精细化管理。运行模式的优化还体现在负荷分配策略上,通过峰谷负荷调节和分流处理策略,使能源消耗更趋合理,同时保证水质达标率和工艺稳定性。综合工艺优化路径与运行模式改进的实施,能够在保持污水处理效率的基础上,实现能耗与碳排放的同步控制。通过对曝气、污泥处理、泵站及辅助系统进行技术升级和运行模式调整,污水处理厂能够充分挖掘节能潜力,优化资源配置,提高能源利用效率,为实现低碳运行提供坚实支撑。

5 综合优化成效与低碳发展启示

综合优化措施在污水处理厂运行中呈现出显著的能效提升与碳减排成效。通过曝气系统、污泥处理单元、水泵及循环系统的协同优化,整体能耗强度得以降低,单位处理水量的电力消耗明显下降。高效微孔曝气器与变频鼓风机的配合,使溶解氧控制更加精准,减少了过量曝气带来的不必要能耗,同时改善了微生物代谢效率,降低氧化亚氮的非必要排放。污泥脱水与厌氧消化工艺的优化,使机械与热能消耗同步降低,沼气回收利用系统将有机废弃物转化为可再生能源,进一步减少对外部电力和热能的依赖,同时控制甲烷排放强度。

水泵系统通过变频调速与流量优化,使输送与回流负荷更加符合实际需求,降低了扬程损失和无效运转能耗。管网优化和泵机组合调整提升了水力利用效率,同时通过智能监控平台实现对各单元能耗的动态分析和调节,为运行管理提供了数据支持。辅助系统的节能改造与自动化控制,使照明、空调及监测设备在保持运行稳定的前提下,实现低功耗操作,有效削

减隐性能源消耗。整体运行模式的优化,通过峰谷负荷调节和分流策略,实现各环节能耗平衡,提升系统整体能效。

在低碳发展背景下,综合优化的实践效果不仅体现在能耗指标的下降,也表现为碳排放强度的显著降低。优化措施能够将直接与间接排放源纳入控制体系,通过能源回收、工艺调整和设备升级实现碳排放减量。高能耗环节的技术改进与运行模式调整相互作用,使系统在稳定出水的同时保持能效最优状态,为实现低碳运行提供可靠保障。技术与管理的结合也体现出对低碳运行策略的启示价值。能耗数据的实时采集与分析能够为决策提供科学依据,优化运行方案,提高能源利用效率。工艺优化与能耗控制的联动,使污水处理厂能够在不同负荷条件下保持稳定且节能的运行状态,形成可推广的低碳管理模式。能源回收、自动化控制与系统联动的实践表明,综合优化不仅能够降低经济成本,还能够在环境效益和低碳发展目标之间建立有效联系,为行业提供了可持续运行路径。

6 结语

通过对污水处理厂能耗结构的深入分析和关键环节的优化研究,工艺改进与运行模式调整实现了能耗降低与碳排放控制的协同效应。综合应用曝气优化、污泥处理改进、水泵系统调节及辅助设施节能措施,不仅提升了能源利用效率,也为低碳目标下污水处理厂的可持续发展提供了实践参考和技术支撑。

参考文献:

- [1] 骆一宁. 污水处理厂建筑物低碳运行与能源梯度利用技术研究 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52(8):132-134.
- [2] 董森, 富英杰, 裘亮, 等. 推进污水处理厂减污降碳协同增效的措施和建议 [J]. 资源节约与环保, 2024 (6):54-57.
- [3] 相凤欣, 马昭, 范晓莉. 新概念污水处理厂的低碳设计技术要点研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2025, (3):174-177.
- [4] 孙同谦, 宁江源. 污水处理厂低碳化设计探讨 [J]. 给水排水, 2024, 60(S1):53-57.
- [5] 王洋. 节能低碳技术在污水处理中的应用研究 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(10):139-141.