

市政污水处理过程中的能效优化研究

姜 通

(水发(北京)建设有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 随着城市化进程不断加快, 市民用水量日益增加, 市政污水处理规模越来越大, 要求越来越高, 能耗问题也越来越突出。市政污水处理能耗既关系到污水处理成本, 又和节能减排等可持续发展目标密切相关。本文探讨了市政污水处理过程中的能效优化策略, 通过对污水处理工艺、设备运行、能源管理等方面进行分析, 识别影响能效的关键因素, 并提出了相应的优化措施, 以期降低污水处理的能耗、提高能效提供借鉴, 从而促进市政污水处理的可持续发展。

关键词 市政污水处理; 能效优化; 节能设备; 工艺参数; 能源管理

中图分类号: X799

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.12.023

0 引言

在全球能源形势越来越紧张、节能减排要求越来越高的大环境下, 提高市政污水处理能效就成了当前迫切需要研究的问题。这一需求不但符合能源的可持续发展理念, 也可以缓解环境污染, 保护好城市的生态环境。一方面, 污水处理需要能耗高的设备和技术, 会提高运营成本; 另一方面, 能耗过高又违背可持续发展理念, 不符合时代发展规律。因此, 如何节能高效地处理污水, 对市政污水处理工艺能效优化问题进行深入的研究, 不仅有理论价值, 更有一定的实际意义。

1 市政污水处理的能耗现状

随着城市化进程的加快, 市政污水处理量不断增加, 其能耗问题日益受到关注。当前市政污水处理厂能耗占城市公共事业能耗的比重颇大, 就总体能耗结构而言, 重点关注了若干关键环节。在所有系统中, 曝气系统的能源消耗占据了最大比例, 通常可以达到总能耗的 40% ~ 70%。曝气旨在向活性污泥内微生物供给足够氧气以分解污水中的有机污染物。传统曝气设备工作效率低下, 为满足微生物需氧量通常需耗费大量电能。例如: 部分较早兴建的污水处理厂所使用的罗茨风机, 其曝气能量转换效率受到限制, 运行时能量损耗大, 造成曝气系统耗能较高。

污水提升泵的能量消耗是一个不能被轻视的问题, 大约占据了整体能耗的 10% ~ 25%。污水提升就是使污水由低液位上升到处理工艺要求的高液位上, 该工艺要克服重力做功而耗费大量电能。特别是对地形复杂或者污水收集管网长的城市来说, 污水上升扬程更高、

能耗更明显。如在某些山地城市中, 因地形高差较大, 污水要经过多次升降, 升降泵工作时间较长, 能耗成本也大大增加^[1]。

2 市政污水处理工艺能效影响因素

市政污水处理工艺能效受诸多因素共同作用, 对其进行深刻认识对能效优化具有重要意义。污水处理工艺对能效有着至关重要的影响, 不同污水处理工艺, 能耗有明显差别。传统活性污泥法技术比较成熟, 但是能耗大, 这一过程要求连续曝气以保持微生物活动, 曝气能耗所占比例较大。尽管新兴的 MBR (膜生物反应器) 技术在处理上展现出了明显的优越性, 并能达到更高的水质要求, 但膜组件的清洁仍是一个挑战。相较于传统的活性污泥处理方法, 维护和膜过滤所需的能源消耗通常要高出 20% ~ 50%。此外, 氧化沟工艺由于其特殊的循环流模式, 曝气能耗有一定的减少, 但是高浓度污水处理过程中可能会增加处理单元而提高总体能耗^[2]。

设备的性能与运行状况同样直接影响能效, 设备高效节能, 能有效地降低能耗。例如: 新型的变频调速水泵能够根据实际的污水流量来自动调节转速, 从而避免了传统定速水泵在流量发生变化时的能源损耗, 与此相比, 它可以节省 15% ~ 30% 的能源。在曝气设备中, 微孔曝气器与传统的穿孔管曝气相比, 能更均匀地分散气泡, 从而提高氧气的使用效率, 并减少曝气能量消耗 10% ~ 20%。但若设备在长时间运行过程中没有得到很好的保养, 例如水泵叶轮的磨损、曝气器的卡死等, 都将造成设备性能降低和能耗的大幅度上升。

污水水质是一个不容忽视的因素。污水中污染物浓度、组成及可生化性均对处理工艺能耗产生影响。高浓度有机污染物需较多氧气才能被氧化和分解，从而提高曝气能耗。例如：当工业废水与日常生活污水混合时，污水中难以分解的有机物的含量会上升，微生物分解这些有机物会消耗更多的能量，这可能导致曝气的能量消耗增加 30% ~ 50%。

3 市政污水处理工艺能效优化方法

3.1 使用高效节能设备

将高效节能设备运用到市政污水处理中，是降低能耗直接而又行之有效的方法，新水泵技术节能效果突出，其使用永磁同步电机驱动的水泵与传统的异步电机水泵相比，工作效率可以提高 8% ~ 15%。永磁同步电机具有出色的功率因数和工作效率，能确保在各种负载状况下都能稳定且高效地工作。同时，该智能水泵控制系统可根据污水流量、液位等信息实时调节水泵运行频率及转速，达到精准供水的目的，避免水泵低效运行及空转现象，并进一步减少能耗。在某些大规模的污水处理设施中，采用智能水泵控制系统可以达到 20% ~ 30% 的节能效果^[3]。

就曝气设备而言，用先进的微孔曝气器代替传统曝气装置效果显著。微孔曝气器能产生细小且均一的气泡，增大氧与污水接触的面积及时间，从而提高氧的利用率。研究发现，与传统的穿孔管曝气相比，微孔曝气器在氧转移效率上提升了 30% ~ 50%，从而显著减少了曝气的能量消耗。另外，一些新射流曝气技术已逐步在污水处理领域得到应用。射流曝气利用高速的射流技术将空气和污水进行深度混合，从而增强了物质传递的过程。这不仅显著提升了曝气的效率，还因为其结构简洁和易于维护的特点，能够节省能源 15% ~ 25%。更新污泥处理设备，也可以有效地降低能耗。例如：使用高压隔膜压滤机等新型污泥脱水机比常规离心脱水机可达到更高的污泥脱水率、降低污泥后续加工难度及能耗。高压隔膜压滤机能够通过二次压榨污泥，将其含水量减少到 60% 以下，而离心脱水机一般只能将污泥的含水量降低到大约 80%。污泥含水率越低意味着污泥填埋和焚烧这类后续加工时需要消耗的能源就越少，因此整体能耗就越小^[4]。另外，可引进高效节能变压器、节能照明系统等。节能变压器使用了创新的铁芯材料和经过优化的绕组设计，这有助于减少变压器在空载和负载时的损耗，从而实现了 10% ~ 20% 的节能效果。而在污水处理厂的照明系统中，采用 LED 照明灯具替代传统的荧光灯，不仅节能效果

显著（可节能 50% ~ 70%），而且使用寿命长，减少了更换灯具的维护成本。

3.2 工艺运行参数优化调整

对工艺运行参数进行合理优化，是市政污水处理能效提升的重要手段，对曝气系统而言，溶解氧浓度的准确控制是非常关键的，常规曝气控制通常使用固定的溶解氧设定值，易造成过度曝气或者曝气不充分，利用在线溶解氧监测仪对污水溶解氧含量进行实时监测，配合智能控制系统根据污水水质、水量变化对曝气量进行动态调节，可以有效地降低能耗。如污水中有机污染物的浓度比较高时，可适当减小溶解氧的设定值和曝气量；但当有机污染物浓度上升时，可适时加大曝气量以保证微生物正常代谢。经过研究发现，使用这种动态的溶解氧控制方法可以将曝气的能量消耗减少 15% ~ 30%。

优化回流比也是节能中至关重要的一环，污泥回流与混合液回流对污水处理工艺具有重要影响，但是回流比过大或过小均会使能耗增大。回流比的合理调节需考虑污水水质、处理工艺及处理效果。以活性污泥法加工工艺为例，通过实验及数据分析，确定了最佳污泥回流比与混合液回流比之间的关系，既保证了活性污泥正常代谢及加工效果，同时也避免了由于回流过多而造成能耗升高的问题。通常，优化后的回流比能够减少能源消耗在 10% ~ 20% 之间。对于水力停留时间（HRT）的优化同样不能忽视。HRT 为污水在被处理构筑物中的平均滞留时间，对处理效果及能耗有着直接的影响。HRT 太长，将造成处理效率下降，能耗升高；而 HRT 太短，会导致污染物不能被完全降解。考虑到各种污水处理技术和水质特性，通过模拟与实际操作数据的对比分析，确定了最优的 HRT 方案，这有助于在确保处理效果的同时减少能源消耗^[5]。例如：在处理一些水质相对稳定的生活污水时，适当减少 HRT 可以提升处理的效率，并将能源消耗降低 10% ~ 15%。另外，污泥龄的优化也能提高能效。污泥龄为活性污泥在处理系统内的平均滞留时间，与微生物生长、代谢及处理效果关系密切。合理地控制污泥龄可以在降低污泥产量、降低污泥处理能耗的前提下保持微生物较好的活性及处理能力。通过对污泥排放策略及工艺参数进行调整，寻找出适用于特定污水处理厂污泥龄的最佳值，可以达到节能降耗之目的。

3.3 运行管理以智能控制为基础

以智能控制为主线进行运行管理，为市政污水处理能效优化提供一种新思路、新途径，该智能控制系

统采用先进传感器技术、自动化控制技术以及信息技术,实现污水处理过程实时监控以及精准控制。通过在污水处理设施的各个关键区域安装各种传感器。例如:水质传感器、液位传感器、流量传感器和溶解氧传感器等,能够实时地收集关于污水的质量、水量以及设备运行状况的各种数据。将上述数据传输至中央控制系统中,经数据分析处理后,由系统按照预设控制策略对装置运行参数进行自动调节^[6]。

以曝气系统智能控制为例,控制系统以实时监控溶解氧浓度、污水流量及水质数据为基础,采用模糊控制、神经网络控制等高级算法进行控制,准确计算所需曝气量及曝气设备运行频率与开启台数,并进行自动调整。该智能控制方式能对水质、水量变化迅速做出反应,避免人为控制滞后与错误,并有效减少曝气能耗。实际应用案例表明,在使用智能曝气控制系统的污水处理设施中,曝气的能量消耗可以减少 20%~40%。智能控制系统也能达到污水提升泵优化控制的目的,通过对污水管网液位、流量等参数进行监控,该系统对提升泵运行组合、转速等参数进行自动调节,保证污水顺利上升,避免水泵启停频繁、效率低下。同时采用预测性维护技术,以设备运行数据为基础,结合故障模型对水泵可能发生的故障提前做出预测并及时维修,降低了因设备故障造成的能耗升高及处理效率降低。

污泥处理环节中智能控制也起到了不可忽视的作用。该智能控制系统通过实时监控污泥浓度和含水率,自动调节污泥脱水机压力和转速等污泥处理设备运行参数,以达到高效脱水和减少污泥处理能耗的目的。另外,该智能控制系统能够实时监控并分析整个污水处理厂能源消耗情况,并产生能耗报表及分析图表,供管理人员决策参考,有助于其及时发现能耗异常点并有针对性地采取节能措施。

3.4 能源回收和再利用技术

能源回收和再利用技术对市政污水处理能效优化具有重要的辅助作用,在污水生物处理过程中,有机物经微生物分解后生成沼气,沼气的主要组分为甲烷,热值高,可以用作能源回收利用。通过构建沼气收集与利用系统实现了对生产沼气的净化、贮存与利用,并可以实现发电与供热功能。如某些大型污水处理厂以沼气为动力,用内燃机来发电,其所生产的电能可以满足污水处理厂某些装置的电力需要,使能源自给自足。根据估算,处理每吨污水时产生的沼气可以发电 0.2~0.5 度,如果能够有效地回收再利用,将能显著

减少污水处理厂的能源消耗成本。另外,污水自身所包含的热能还有回收利用价值,冬季污水温度比较高,利用污水源热泵技术,可以从污水中抽取热能为污水处理厂建筑供热或者工艺加热。污水源热泵系统采用污水作为较低温度的热源,并通过热泵机组将热量提升到可接受的温度,与传统的锅炉供暖方式相比,能够实现 30%~50% 的节能效果。夏季也可采用污水源热泵来达到制冷的目的,进一步提升了能源的利用效率^[7]。

污泥处理过程中还可采用厌氧发酵等工艺回收能源,污泥厌氧发酵产沼气,既可发电,也可加热。同时污泥经厌氧发酵后稳定性得到了改善,降低了后续处理的难度,能耗得到了相应降低。另外,污泥焚烧后的热量还可由余热回收装置回收利用以产生蒸汽或者发电,以达到污泥处理过程能量平衡。

能源回收及再利用技术既可以降低污水处理厂能耗,又可以在减少温室气体排放的前提下减少对外部能源的依赖、降低运行成本等,经济环境效益显著。

4 结束语

市政污水处理工艺能效优化作为一项系统工程,关系到污水处理各环节。通过深入剖析能效现状,确定关键影响因素并提出和执行有效优化策略可显著降低污水处理能耗和提升能源利用效率。这样既有利于降低污水处理厂运营成本和增加经济效益,又有利于污水处理行业的可持续发展。在科学技术日益发展的今天,还应不断探索更先进的能效优化技术与管理方法来应对污水处理要求与环保要求的提高。

参考文献:

- [1] 范久林.市政给排水工程污水处理的技术分析[J].清洗世界,2023,39(11):124-126.
- [2] 谢家鑫.市政污水处理工艺流程及节能降耗浅析[J].江西建材,2023(12):391-392.
- [3] 吴艳涛.市政污水处理厂工艺设计与应用[J].资源节约与环保,2023(12):106-109.
- [4] 察鲁华.浅析给排水工程中城市污水处理现状[J].长江技术经济,2020,04(S2):15-16.
- [5] 陈莉.市政给排水工程污水处理的技术与发展探索[J].居舍,2020(15):41.
- [6] 李旺霞.“双碳”背景下污水处理行业降碳减排路径研究[J].资源节约与环保,2024(10):13-16.
- [7] 宋涛,兰玲,贺亚.城市污水处理厂能耗分析及节能措施研究[J].节能与环保,2023(03):90-92.