

污水处理厂污水处理节能技术改进研究

季小武¹ 庄和妙²

1. 温州市排水有限公司 浙江 温州 325000

2. 浙江净神环保科技有限公司 浙江 温州 325000

摘要: 污水处理厂作为城市水循环关键环节, 能耗问题突出。当前其能耗集中在电耗、药耗与热能消耗, 核心耗电设备包括提升水泵、曝气风机等。节能技术改进可从多维度展开: 工艺上, 优化生物处理、污泥处理工艺; 设备上, 选用高效曝气、变频调速及节能型搅拌设备; 管理上, 引入智能控制系统实现精准调控; 能源回收方面, 利用沼气发电、污水源热泵等技术。通过综合改进, 可显著降低能耗, 提升运行效率, 实现可持续发展。

关键词: 污水处理厂; 污水处理; 节能技术; 改进

引言: 随着我国城市化进程加速与环保要求日益严格, 污水处理厂数量与处理规模持续攀升。然而, 其高能耗问题也愈发凸显, 不仅增加了运营成本, 还与绿色低碳发展理念相悖。污水处理厂能耗涵盖电耗、药耗及热能消耗等多个方面, 其中电耗占比最高, 核心设备能耗大, 且存在设备老化、工艺设计不合理等导致能耗浪费的现象。因此, 开展污水处理厂污水处理节能技术改进研究迫在眉睫, 通过优化工艺、升级设备、智能管控及能源回收等举措, 降低能耗, 提升处理效能, 实现可持续发展。

1 污水处理厂能耗分析与关键环节识别

1.1 污水处理厂能耗构成

(1) 电耗: 是污水处理厂最主要的能耗类型, 占总能耗的60%-80%。核心耗电设备包括提升水泵(负责污水输送, 占电耗30%左右)、曝气风机(为生物处理供氧, 占电耗40%-50%)、搅拌机(维持混合液均匀, 占电耗5%-10%), 此外还有刮泥机、脱水机等辅助设备耗电。(2) 药耗: 虽能耗占比低于电耗, 但直接影响处理成本与效果。主要消耗的化学药剂有混凝剂(如聚合氯化铝)、消毒剂(如次氯酸钠)、脱氮除磷药剂(如聚丙烯酰胺), 药剂制备与投加过程需配套设备运行, 间接产生能耗。(3) 热能消耗: 集中于污泥处理环节, 占总能耗10%-20%。污泥脱水前需加热调质(如蒸汽加热至30-40℃), 干化过程需消耗天然气或电能加热空气, 部分厂采用余热回收系统可降低热能损耗。

1.2 能耗关键环节识别

(1) 生物处理单元: 能耗占比超50%, 核心为曝气系统。传统鼓风曝气氧利用率仅20%-30%, 若曝气过量或分布不均, 会造成30%以上的能源浪费; 氧化沟、MBR等工艺的曝气能耗差异显著。(2) 污泥处理单元:

能耗随污泥含水率下降而升高。脱水环节(板框压滤、离心脱水)需高功率设备, 干化环节(热风干化、太阳能干化)的热能消耗占比达污泥处理总能耗的60%以上, 污泥厌氧消化的沼气回收可部分抵消能耗。(3) 提升泵站与输送系统: 能耗与输送距离、扬程相关。进水提升泵站需克服地形高差, 中途泵站的变频控制可降低能耗波动, 污水、污泥管道的沿程阻力会增加输送设备的能耗负荷^[1]。

1.3 能耗影响因素分析

(1) 进水水质波动: COD、BOD、NH₃-N等指标骤升时, 需增加曝气强度、延长水力停留时间, 导致电耗上升; 进水悬浮物过高会加重预处理负荷, 增加格栅、沉砂池设备运行时间, 同时提高污泥产量, 间接增加污泥处理能耗。(2) 设备老化与效率下降: 风机、水泵使用5年以上后, 叶轮磨损、电机效率降低, 能耗可上升15%-20%; 搅拌机桨叶变形会导致混合效果下降, 需提高转速弥补, 进一步增加电耗; 仪表故障(如溶氧仪不准)会导致曝气控制失衡, 造成能源浪费。(3) 工艺设计缺陷: 曝气系统布气不均会导致局部溶氧过高或不足, 增加能耗且影响处理效果; 污泥处理工艺选择不当(如低含水率污泥采用直接干化)会提升能耗; 水力停留时间设计过长, 会增加水池容积和设备运行时长, 间接增加能耗^[2]。

2 污水处理厂污水处理现有节能技术综述与适用性分析

2.1 工艺优化节能技术

(1) 生物处理工艺改进: A²/O工艺通过优化厌氧、缺氧、好氧段停留时间比, 可降低曝气能耗15%-20%, 适用于氮磷污染严重的市政污水厂; MBR工艺采用膜分离替代二沉池, 减少污泥回流能耗, 但膜组件成本高,

更适合用地紧张、出水标准高的场景；SBR工艺通过时序控制实现间歇曝气，能耗较传统工艺低10%-15%，适用于中小规模、水质波动大的污水厂。（2）污泥处理工艺优化：厌氧消化工艺将污泥有机物转化为沼气，可回收总能耗的30%-40%，适用于污泥产量大（日产量超50吨）的污水厂；好氧堆肥通过微生物发酵实现污泥减量化，无需额外加热，能耗仅为干化工艺的1/5，但需较大场地，适合有农业资源化需求的地区。

2.2 设备升级节能技术

（1）高效曝气设备：微孔曝气器氧利用率35%-45%，较传统曝气头节能20%-30%，适用于新建或曝气系统改造的污水厂；磁悬浮风机比罗茨风机节能30%-40%，噪音低、维护量小，但初期投资高，适合长期运行、曝气需求稳定的大型污水厂。（2）变频调速技术：应用于水泵、风机时，可根据进水流量、溶氧需求动态调节转速，平均节能25%-35%，尤其适用于水质、水量波动大的污水厂，对老旧设备改造性价比高。（3）节能型搅拌设备与污泥泵：永磁同步搅拌器能耗较传统异步电机低15%-20%，适用于生物反应池；无堵塞污泥泵通过优化叶轮结构减少能耗，避免堵塞停机，适合高浓度污泥输送场景^[3]。

2.3 智能控制节能技术

（1）基于物联网的实时监控系統：通过传感器实时采集进水水质、设备参数，实现远程监控与故障预警，减少人工运维成本，适用于规模化、多站点管理的污水厂集群。（2）曝气量智能调控：基于DO浓度反馈控制，动态调整曝气量，避免过量曝气，节能10%-20%，需配合精准溶氧仪，适用于生物处理单元自动化程度高的污水厂。（3）泵站优化调度算法：根据管网流量预测调整水泵运行台数与转速，降低输送能耗15%-25%，适用于多泵站联合运行的市政污水管网系统。

2.4 能源回收与利用技术

（1）污泥厌氧消化产沼气发电：每吨污泥可产沼气150-250m³，发电300-500kWh，能满足污水厂10%-30%的用电需求，适用于污泥有机质含量高（VS > 60%）的污水厂。（2）污水源热泵技术：利用污水水温稳定特性（冬季10-15℃、夏季20-25℃），为厂区供暖制冷，节能率达40%-60%，适合气候温和、污水量稳定的污水厂。（3）余热回收装置：回收曝气风机、污泥干化机等设备的余热，用于污泥加热或厂区供暖，可降低热能消耗15%-20%，适用于高能耗设备集中的污水厂。

3 污水处理厂污水处理节能技术改进方案设计

3.1 改进目标与原则

（1）节能率目标设定：短期（1-2年）实现全厂总能耗降低15%-20%，其中生物处理单元能耗下降25%以上，污泥处理单元能耗降低18%-22%；中期（3-5年）结合能源回收系统，实现能耗自给率提升至25%-30%，达到区域内污水处理厂节能标杆水平。分阶段设定目标，优先针对高能耗环节（如曝气系统、污泥干化）突破，每季度开展能耗审计，动态调整目标进度。（2）经济性与可行性平衡：遵循“短期见效、长期收益”原则，优先选择投资回收期 < 3年的项目（如变频调速改造、曝气量精准控制），避免盲目投入高成本技术。兼顾现有设施基础，对服役年限 < 8年的设备以改造为主，超期设备优先替换；结合污水厂规模（如万吨级以下优先小型化智能控制系统）、地域资源（北方优先余热回收，南方侧重污水源热泵）制定方案，确保技术落地可行性^[4]。

3.2 工艺优化方案

（1）曝气系统精准控制：采用溶解氧（DO）分级控制策略，生物反应池好氧段按进水BOD浓度分3级设定DO值（低负荷0.8-1.2mg/L、中负荷1.2-1.8mg/L、高负荷1.8-2.5mg/L），通过在线DO传感器实时反馈，联动曝气风机变频调节。针对MBR工艺，在膜池增设DO分区监测，避免局部曝气过量，预计可降低曝气能耗20%-25%；配套建设曝气管道清洗系统，每半年清理一次，维持氧利用率稳定。（2）污泥回流比动态调整：基于进水TN、TP浓度与二沉池污泥界面高度，建立回流比动态调节模型。当进水TN > 25mg/L时，将污泥回流比从传统30%-50%提升至50%-70%，同时降低混合液回流比；当二沉池污泥界面 > 1.5m时，减少回流比至20%-30%，避免污泥流失。通过PLC控制系统实现自动调节，减少无效回流能耗，预计可降低污泥处理单元能耗12%-15%。

3.3 设备升级方案

（1）高效节能设备选型与替换：曝气系统优先替换为微孔陶瓷曝气器（氧利用率40%-45%，较传统曝气头节能25%），风机选用磁悬浮离心风机（比罗茨风机节能35%-40%，噪音 ≤ 85dB），单台处理风量匹配生物池需气量（如5万吨/日污水厂选用100m³/min风机2台，1用1备）。污泥处理设备方面，将传统板框压滤机替换为高压隔膜压滤机，污泥含水率从80%降至60%-65%，减少后续干化能耗；输送泵选用无堵塞潜水污泥泵（效率 ≥ 80%，较普通泵节能15%），适配高浓度污泥输送需求^[5]。（2）变频调速系统应用：对进水提升泵、回流泵、曝气风机全面加装变频调速装置，采用“流量-频率”联动控制逻辑。进水提升泵根据格栅前后液位差调节转速（液位差 > 1.2m时提频， < 0.5m时降频）；回流

泵结合污泥浓度传感器数据动态调速；风机根据DO反馈信号实时调整频率，避免设备空载运行。配套安装电能监测模块，实时统计变频设备节能效果，预计整体可降低设备运行能耗22%-28%。

3.4 智能控制系统集成

(1) SCADA系统构建：搭建覆盖全厂的监控与数据采集(SCADA)系统，整合进水水质(COD、NH₃-N、SS)、设备运行参数(电流、电压、转速)、能耗数据(各单元用电量、热能消耗)等12类监测指标，实现“集中监控、分散控制”。系统设3级权限(操作员、工程师、管理员)，支持手机APP远程查看，异常数据(如设备电流超标、DO骤降)实时推送预警，响应时间<5分钟；建立历史数据库(存储周期5年)，为能耗分析与工艺优化提供数据支撑。(2)机器学习算法优化运行参数：基于SCADA系统历史数据，训练LSTM(长短期记忆)算法模型，预测未来24小时进水流量与水质变化，提前优化曝气强度、回流比等参数。例如，通过算法识别雨天进水SS骤升规律，提前降低二沉池出水堰高度，减少污泥流失；针对工业污水占比高的污水厂，加入水质突变识别模块，自动触发应急运行模式。算法每月更新一次，结合实际运行效果修正参数，预计可进一步降低能耗8%-12%，提升处理稳定性。

3.5 能源回收系统设计

在污泥厌氧消化车间建设沼气净化系统(脱硫、脱水、脱碳)，将沼气纯度提升至95%以上，配套2台500kW沼气发电机组(1用1备)，发电优先供给厂区设备(如曝气风机、污泥泵)，剩余电量并网。发电机组

余热通过余热锅炉回收，产生0.3MPa蒸汽，用于污泥厌氧消化罐加热(维持罐温35-38℃)与厂区冬季供暖，余热利用率达70%以上。在曝气风机房、污泥干化车间安装余热回收换热器，回收设备散热用于车间采暖或污水预处理加热，预计可降低全厂热能消耗30%-35%。装置布局遵循“就近利用”原则，沼气管道与余热管道均设置保温层，减少输送损耗。

结束语

污水处理厂节能技术改进研究意义重大且成果可期。通过对能耗的深入剖析，明确了关键耗能环节与影响因素，进而从工艺优化、设备升级、智能控制及能源回收等多方面提出改进策略。这些技术改进措施不仅能切实降低污水处理厂的能耗，减少运营成本，还可提升处理效果与稳定性。未来，随着技术的持续创新与完善，应进一步推广应用节能技术，推动污水处理行业向绿色、低碳、可持续方向大步迈进。

参考文献

- [1]王乃亮,黄慧,高磊.污水处理厂污水处理节能技术改进研究[J].资源节约与环保,2022,(04):64-66.
- [2]赵银秋.污水处理厂污水处理节能技术改进研究[J].产业科技创新,2020,(09):33-34.
- [3]刘峰.污水处理厂污水处理节能技术改进研究[J].建筑工程技术与设计,2020,(10):137-139.
- [4]王晓琳.污水处理厂污水处理节能技术改进研究[J].建筑工程技术与设计,2020,(07):80-81.
- [5]乾浩,黄艳.污水处理厂污水处理节能技术改进研究[J].城镇建设,2020,(11):174-175.