

城镇污水处理厂深度处理工段技术路线总结分析

徐瑞捷 曹一丰

中国市政工程华北设计研究总院有限公司 天津 300381

摘要: 近年来污水厂的出水标准日趋严苛, 全国各地所制定的地方标准普遍要求污水处理厂出水水质接近(甚至部分指标超过)IV类水体的水质要求(即业界通常说的“准IV类”水质), 个别地方已达到“准III类”水体指标。深度处理工段起到了对高排放标准城镇污水厂出水严格把关的作用, 但当前国家层面的各类规范、设计手册等文件尚未对深度处理工艺技术路线的选择形成有效指导。因此本文将大量工程案例为基础, 针对城镇污水处理厂深度处理技术路线选择进行分析, 以期高排放标准污水处理厂的设计提供参考。

关键词: 污水厂; 深度处理; 技术路线选择

Summary and Analysis of Technical Route of Advanced Treatment Section of Urban Sewage Treatment Plant

Ruijie Xu, Yifeng Cao

China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., LTD., Tianjin, 300381

Abstract: In recent years, the effluent standards of sewage plants are increasingly stringent. The local standards made throughout the country generally require that the effluent water quality of sewage treatment plants is close to (even some indicators exceed) the water quality requirements of class IV water (that is, the industry usually says “quasi class IV” water quality), and some places have reached the “quasi class III” water index. The advanced treatment section plays the role of strictly controlling the effluent of urban sewage plants with high discharge standards. However, various national specifications, design manuals, and other documents have not yet provided efficient guidance for the selection of the advanced treatment process and technical route. Therefore, this paper will be based on a large number of engineering cases, for urban sewage treatment plant advanced treatment technology route selection analysis to provide a reference for the design of high discharge standard sewage treatment plant.

Keywords: Sewage plant; Advanced Treatment; Technical route selection

一、研究思路概况

本研究主要分四步走: 第一步, 对现阶段国内各地出台的地方标准进行分类、分级对比, 划分污水厂出水标准的等级; 第二步, 按照不同水质指标对现阶段常用的深度处理工艺总结分析; 第三步, 开展拟实地调研的污水厂选取工作, 确定调研污水厂的选取原则, 实地走访、调研各污水处理厂; 第四步, 结合调研污水厂深度处理工段的实际运行情况, 按照划分后的污水处理厂出水标准等级分别提出深度处理工段技术路线的推荐方案。

二、污水处理排放标准等级划分

当前, 国家层面出台的最为严格的排放标准是国标一级A标准。但近年来部分省、市或地区跟据水污染实

际状况和经济实力, 相继对污水处理厂出水提出了更高的水质要求。结合全国范围内各地方出水标准, 可以看出随着COD出水要求的提高, BOD、SS、氨氮、TN、TP等指标的要求也相继提高。

因此, 对污水处理排放标准的等级划分将按照COD的出水要求共分为4个等级, 各等级指标的具体要求如下表所示, 该等级划分基本涵盖了国内各地方的污水处理排放标准:(见下表1)

三、常用深度处理工艺总结

传统出水标准为一级A的污水处理厂一般在深度处理阶段只需考虑去除的重点是形成SS以及TP的颗粒状和胶体状杂质, 后续设置消毒装置保证大肠菌群的达标^[1]。

表1 污水处理排放标准等级划分(单位: mg/L)

| | COD | BOD | SS | 氨氮 | TN | TP |
|---|-----|-----|----|-------|-------|-----|
| 1 | 50 | 10 | 10 | 4~8 | 12~15 | 0.5 |
| 2 | 40 | 10 | 10 | 3~5 | 12~15 | 0.4 |
| 3 | 30 | 6 | 5 | 1.5~4 | 10~12 | 0.3 |
| 4 | 20 | 4 | 5 | 1~1.5 | 10 | 0.2 |

但随着我国各地陆续出台严苛的污水处理要求, 深度处理工段还应考虑对难降解有机物及总氮、氨氮的去除及稳定达标。

按水质指标分类的不同深度处理工艺总结如下:

表2 常用污水深度处理工艺总结表

| 指标 | 处理工艺 |
|------|---|
| COD | 活性炭吸附工艺 臭氧高级氧化工艺 |
| 氨氮 | 硝化曝气生物滤池工艺 |
| 总氮 | 反硝化生物滤池工艺 深床滤池工艺 活性砂滤池工艺 纤维束(或纤维滤料)滤池工艺 |
| SS | V型滤池工艺 深床滤池工艺 活性砂滤池工艺 滤布滤池工艺 纤维束(或纤维滤料)滤池工艺 |
| TP | 高效沉淀池工艺 磁混凝沉淀池工艺 加砂沉淀池工艺 气浮工艺 |
| 消毒工艺 | 紫外线消毒 臭氧氧化 |

(注: BOD的出水主要是依靠生物处理保证的, 一般而言运行良好的污水厂二级处理BOD出水可稳定在10 mg/L以下。更高要求的BOD出水要求则需要依靠过滤保证。所以这里不再单独列出去除BOD的工艺。)

四、调研污水厂的选取

为了充分了解不同深度处理工段在设计和运行当中的应用情况, 更好的完善本研究相关内容, 为研究的结论提供实践依据, 选取调研项目的原则如下:

1. 根据不同种类的深度处理工段, 每个工段至少要有2~3个污水处理厂调研案例;

2. 为便于调研实际运行情况, 尽可能选择已经建成投产的污水处理厂, 在建的污水处理厂必须也已进入设备安装调试阶段;

3. 调研的污水处理厂所处地区应尽可能分散, 便于消除因地域不同所产生的差异;

4. 调研的污水处理厂出水执行标准应有所差异, 便于研究同一种工艺在不同出水标准下的设计和运行情况;

5. 调研项目的规模应涵盖大、中、小型污水处理厂。

调研项目基本情况如下表所示:

表3 调研项目污水厂基本情况表

| 序号 | 项目概况 | 深度处理工艺 |
|----|---------------------|-------------------------------------|
| 1 | 污水厂A天津市 60万吨/天 | 高效沉淀池-深床滤池-臭氧接触池-紫外消毒 |
| 2 | 污水厂B天津市 55万吨/天 | 高效沉淀池-深床滤池-臭氧接触池-紫外消毒 |
| 3 | 污水厂C石家庄市 20万吨/天 | V型滤池-加氯消毒 |
| 4 | 污水厂D石家庄市 60万吨/天 | 反硝化生物滤池-高效沉淀池/加砂沉淀池-滤布滤池-臭氧接触池-紫外消毒 |
| 5 | 污水厂E杭州市 60万吨/天 | 深床滤池-紫外消毒 |
| 6 | 污水厂F杭州市 30万吨/天 | 深床滤池-紫外消毒 |
| 7 | 污水厂G无锡市 30万吨/天 | 高效沉淀池/气浮池-深床滤池-加氯消毒 |
| 8 | 污水厂H秦皇岛 10万吨/天 | 高效沉淀池-活性砂滤池-加氯消毒 |
| 9 | 污水厂I秦皇岛 12万吨/天 | 高效沉淀池-活性砂滤池-加氯消毒 |
| 10 | 污水厂J昆山市 4.8万吨/天 | 高效沉淀池-V型滤池-紫外消毒 |
| 11 | 污水厂K太原市 15万吨/天 | 高效沉淀池-V型滤池 |
| 12 | 污水厂L杭州市 10万吨/天 | V型滤池-紫外消毒 |
| 13 | 污水厂M天津市 2万吨/天 | 高效沉淀池-活性砂滤池-深床滤池-臭氧高级催化氧化池 |
| 14 | 污水厂N淮安市 10万吨/天 | 曝气生物滤池-后置反硝化生物滤池-磁混凝沉淀池-加氯消毒 |
| 15 | 污水厂O淮安市 10.5万吨/天 | 活性炭应急投加-磁混凝沉淀池-加氯消毒 |
| 16 | 污水厂P宁波市 24万吨/天 | 磁混凝沉淀池-加氯消毒 |
| 17 | 污水厂Q宁波市 2.5万吨/天 | 磁混凝沉淀池-活性砂滤池-加氯消毒 |
| 18 | 污水厂R义乌市 16万吨/天 | 加砂沉淀池-深床滤池-臭氧接触池 |
| 19 | 污水厂S长沙市 36万吨/天 | 深床滤池-紫外消毒 |

| 序号 | 项目概况 | 深度处理工艺 |
|----|--------------------|---------------------|
| 20 | 污水厂T 遵义市 10万吨/天 | 纤维束滤池-紫外消毒 |
| 21 | 污水厂U 无锡市 11万吨/天 | 深床滤池-加氯消毒 |
| 22 | 污水厂V 石家庄 3万吨/天 | 活性炭应急投加-磁混凝沉淀池-加氯消毒 |

五、深度处理工艺路线分析

1. 第1等级出水标准

根据表1, 除氨氮、TN要求较高以外, 其余指标均与国标一级A标准一致。通常而言一般城市污水处理厂生物处理工段即可保证第1等级标准下COD及BOD的出水达标, 对于某些混杂入部分工业废水的城镇污水厂而言可采用应急投加活性炭工艺, 本等级出水标注需要重点关注的污染物是氨氮、总氮和TP和SS。

对于氨氮而言, 常用的深度处理工艺是硝化曝气生物滤池, 该工艺属生物膜法。其主要原理是通过附着在介质“滤料”表面的微生物, 辅以鼓风曝气形成生物膜去除 NH_3 等物质。此外, 由于硝化曝气生物滤池过滤能有效的截留水中的悬浮物, 也可大幅降低出水SS, 从而进一步去除COD、BOD、TP等污染物。

总氮的稳定达标无论在哪个标准等级下均是最为困难的任务。深度处理工艺中起到去除总氮作用的有反硝化生物滤池、深床滤池及活性炭砂滤池。其中反硝化生物滤池的主要作用就是脱氮, 而深床滤池及活性炭砂滤池则在起到主要截留过滤作用的同时兼顾总氮的去除功能, 其硝态氮负荷较低 ($0.3\text{kgNO}_3\text{-N/m}^3\cdot\text{d}$), 仅针对出水总氮起到把关去除作用。一般而言, 若需去除的硝态氮 $\leq 5\text{mg/L}$, 首选深床滤池或活性炭砂滤池工艺, 同时建议配合调整生物池的碳源投加量; 若硝态氮的去除量在 5mg/L 以上, 建议采用反硝化滤池^[2]。

城镇污水生物脱氮除磷系统的出水中TP普遍可以达到 $1\sim 1.5\text{mg/L}$, 部分可以达到 0.5mg/L 的一级A排放标准, 除了在生物系统出水端大量投加除磷药剂以外, 还可采用高效沉淀池工艺^[2]。该工艺在保证出水TP稳定 $\leq 0.5\text{mg/L}$ 的同时, 还具有占地节省、运行成本较其余沉淀工艺低下等特点。

根据德国ATV标准, 二级处理出水SS当中含有部分BOD、COD、氮及TP等污染物。因此为保证氨氮、总氮、有机物及TP的稳定达标, SS需要至少稳定在 10mg/L 以下。通常会在沉淀工艺后辅以过滤工艺。当仅用作过滤使用时, 首推V型滤池工艺, 但实际工程当中V型滤池的滤格数量通常 ≥ 4 , 因此不适合在小规模工程中使

用。小规模污水厂(5万吨/日以下)可采用活性炭砂滤池工艺; 兼顾少量反硝化或除磷功能时, 可采用深床滤池、活性炭砂滤池或纤维束(或纤维滤料)滤池; 占地异常紧张, 且前序处理设施可自行达标, 该工艺段仅做出水保障使用时, 可采用滤布滤池或精密过滤设备。

2. 第2等级出水标准

在第2等级的出水排放标准当中, COD、氨氮、总氮及TP的要求较第1等级更加严格, 因此上述四个指标均为需重点关注的污染物。此外, 因TP的更加严格要求, SS仍要列为需重点关注的污染物之一。

氨氮及总氮的推荐工艺与第1等级相同。即在充分挖掘二级处理生物系统的处理能力前提下, 氨氮采用硝化曝气生物滤池去除, 总氮视硝态氮的超标情况而言, 酌情选择反硝化生物滤池工艺或深床滤池/活性炭砂滤池工艺。

常规的高效沉淀池足以保证 $\text{TP} \leq 0.5\text{mg/L}$ 的要求, 但在面对 $\text{TP} \leq 0.4\text{mg/L}$ 的标准要求下, 通过加大除磷药剂的投加并不能保证TP的稳定达标, 且从长远来看, 使用大剂量药剂投加会使得污水厂的运行成本提高。除了高效沉淀池之外, 常用的除磷工艺包括磁混凝沉淀池、加砂沉淀池及气浮池: 1) 气浮工艺的TP去除效果最为优异, 该工艺已有TP出水 $\leq 0.05\text{mg/L}$ 的成功运行案例, 且可以大幅度节省除磷药剂投加量。根据相关工程案例, 气浮工艺的PAC投加量仅为混凝沉淀工艺的70%, PAM投加量为混凝沉淀工艺的25%~50%; 2) 磁混凝沉淀池的除磷效果也值得一提, 在多个 $\text{TP} \leq 0.4\text{mg/L}$ 乃至 0.3mg/L 的项目当中应用效果良好; 3) 加砂沉淀池砂的优点是负荷高, 节省占地, 适用于用地紧张的情况。但其缺点就是达到同样的出水水质, 加药量比磁混凝沉淀工艺和气浮工艺大。

第2等级出水标准和第1等级出水标准对SS的要求差别不大, 去除SS的工艺仍推荐采用活性炭砂滤池工艺或V型滤池工艺。

COD的去除可以分为以下两种工艺措施: 1) 针对原水以生活污水为主的城市污水, 可采取应急投加活性炭的措施保证COD的出水要求。活性炭应急投加点通常设置在磁混沉淀池前端或生物池内, 设置在磁混沉淀池前端的建议预先留出活性炭投加反应池并加设搅拌器等混合措施。活性炭的投加存储可以选择建立内设活性炭料仓及投加装置的活性炭投加间, 亦或是仅在厂内存储袋装活性炭在COD短时超标时应急投加。2) 对于工业废水比例较高(一般 $\geq 30\%$)的城市污水, 建议结合烧杯试验对不达标原因进行分析, 当非化学沉淀类(溶解性)难生物降解COD含量过高引起超标时, 推荐采用臭

氧高级氧化工艺。

3. 第3等级出水标准

相比第1、第2等,第3等级出水标准对各水质指标均有了更为严格的限制约束,因此CDO、BOD、SS、氨氮、总氮、TP、色度均应列为第四等级出水标准下需重点关注的出水指标。

氨氮及总氮的推荐工艺与第1、2等级相同,但上述深度处理选择的前提都应在充分挖掘二级处理的潜能的前提下进行。

第3等级出水标准对TP的要求均是 ≤ 0.3 mg/L。如前所述磁混凝沉淀池或气浮工艺均可以满足这一要求。根据工程案例实地调研来看,气浮工艺的TP去除效果更为优异,该工艺已有TP出水 ≤ 0.05 mg/L的成功运行案例,且可以大幅度节省除磷药剂投加量。根据无锡市某污水处理厂气浮池运行数据来看,出水TP ≤ 0.3 mg/L时PAC投加量约40~50 mg/L,PAM投加量是0.1~0.2 mg/L;而宁波某污水厂的磁混凝沉淀池的PAC投加量约50~60 mg/L,PAM投加量是0.2~0.4 mg/L。综上所述,磁混凝工艺和气浮工艺均可以满足 ≤ 0.3 mg/L的要求,而气浮工艺的除磷药剂投加量更低但电耗较高,在实际选择当中应经过经济比较后确定。

第3等级出水标准和第1、2等级出水标准相比更高,去除SS的工艺仍推荐采用活性砂滤池工艺或V型滤池工艺。

对于COD而言,针对原水以生活污水为主的城市污水,可采取应急投加活性炭的措施保证COD的出水要求。而对于工业废水比例较高(一般 $\geq 20\%$)的城市污水,因非化学沉淀类(溶解性)难生物降解COD含量高引起超标时采用臭氧高级氧化工艺。

4. 第4等级出水标准

第4等级出水标准主要是针对北京地区制定的,在现阶段国内已经出台的各地方标准中最为严格。其对各水质指标均有了更为严格的限制约束,因此COD、BOD、SS、氨氮、总氮、TP、色度均应列为本出水标准下需重点关注的出水指标。

氨氮及总氮的推荐工艺仍应以硝化曝气生物滤池及反硝化生物滤池为主。但值得一提的是,在氨氮 ≤ 1 mg/L及总氮 ≤ 10 mg/L这一严格标准要求下,仅靠深度处理工段保证出水稳定达标是不经济合理的,在利用化曝气生物滤池及反硝化生物滤池脱氮的同时应加强生物系统的处理能力。

第4等级标准要求的TP出水 ≤ 0.2 mg/L,结合实地工程案例考察结果及前述分析,只有气浮工艺可保证这一要求。

对于SS而言,建议采用已在给水处理工程中长期应用的V型滤池工艺,或采用UF等膜过滤工艺。

COD推荐采用臭氧氧化工艺去除,并严格按照所需去除的难降解有机物浓度提高臭氧的投加量,或在臭氧氧化中增加催化工艺。

六、结论

1. 总结来看,各等级深度处理工段的技术路线如下表所示;

表4 深度处理工段技术路线推荐表

| 等级 | 深度处理工艺路线推荐 | |
|-----|---|---|
| | 小规模污水厂 (≤ 5 万吨/天) | 大规模污水厂 (> 5 万吨/天) |
| I | 二级处理—高效沉淀池—活性砂滤池—消毒出水 | 二级处理—高效沉淀池—V型滤池/深床滤池—消毒出水 |
| II | 二级处理—高效沉淀池/磁混凝沉淀池/气浮池—活性砂滤池—活性炭/臭氧工艺—消毒出水 | 二级处理—高效沉淀池/磁混凝沉淀池/气浮池—V型滤池/深床滤池—活性炭/臭氧工艺—消毒出水 |
| III | 二级处理—磁混凝沉淀池/气浮池—活性砂滤池—活性炭/臭氧工艺—消毒出水 | 二级处理—磁混凝沉淀池/气浮池—V型滤池/深床滤池—活性炭/臭氧工艺—消毒出水 |
| IV | 二级处理—气浮池—V型滤池/膜过滤工艺—臭氧(催化)氧化工艺—消毒出水 | 二级处理—气浮池—V型滤池/膜过滤工艺—臭氧(催化)氧化工艺—消毒出水 |

2. 需要指出的是,上述技术路线中,氨氮或总氮超标严重时需视超标情况二级处理后增加硝化曝气生物滤池或反硝化生物滤池,已利用臭氧工艺的工程可不再增加单独的消毒工艺。

3. 消毒工艺的选择应综合用地、投资的情况决定。半地下或全地下污水处理厂推荐采用紫外线消毒工艺,同时为保证消毒效果建议厂内配套补加氯消毒装置;用地相对宽松的地上式污水处理厂推荐采用加氯接触工艺。在利用紫外线工艺进行消毒时化学除磷药剂的选择要尽量避免三氯化铁等铁盐物质。

参考文献:

- [1]李志超.合肥西部某污水处理厂工艺设计及优化的研究[D].天津:天津大学,2017.(07):59-62.
- [2]郑兴灿,李激,孙永利,尚巍,游佳,李鹏峰,宁冰.全国城镇污水处理厂除磷脱氮及深度处理技术交流会[C].无锡,住房和城乡建设部,2010.(05):1-416.
- [3]张凯松,周启星,孙铁珩.城镇生活污水处理技术研究进展[J].世界科技研究与发展,2003(10).85-89.