

基于多点进水三级 A/O+MBBR 工艺的城市生活污水 处理技术

文 / 钱荣羊 安徽省城建设计研究总院股份有限公司

摘要: 在城市快速发展背景下,生活污水量大幅提升,使得如何高质量高效化处理城市生活污水成为一项重点难题,影响着人民群众的生活质量。本文以提高污水处理技术水平为研究目标,结合城市生活污水处理现状,分析了多点进水三级 A/O 与 MBBR 工艺原理,系统性阐述了基于多点进水三级 A/O+MBBR 工艺的污水处理技术要点,并总结其应用效果与有效应用措施。研究表明,应用该种生活污水处理技术,有助于降低污染物指标,改善我国水资源环境。
关键词: 城市生活污水; 多点进水三级 A/O; MBBR 工艺

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.114

引言

我国作为一个水资源匮乏的国家,近年来伴随着城市建设工作的有序推进,淡水资源愈加匮乏,成为社会热点讨论话题,不仅影响着群众的日常生活,还关系到城市经济的可持续发展。据城市日报调查结果显示,水资源污染属于我国水资源匮乏的主要原因之一,每年约有 2000 亿 t 的污水未经处理直接排放,导致我国 75% 的湖泊处于富营养状态。虽然现阶段全国城市污水处理率已达到 70%,但仍处于水资源污染严重的状态。对此,为提高城市生活污水处理质量,需围绕多点进水三级 A/O+MBBR 工艺的污水处理技术展开深入研究。

一、城市生活污水处理现状

据不完全统计,截至 2022 年,我国共有 2894 座城市污水处理厂,处理能力为 21606 万 m³/日,在一

定程度上缓解污水排水压力。通过进一步分析可知,城市以中大型污水处理厂为主,日处理量为 7.47 万 m³,县城则以小型为主,日处理量为 2.32 万 m³,其中城市污水处理率约为 97.53%,污水处理厂集中率约为 95.78%。但就目前状况而言,处理城市生活污水过程中,存在污染负荷控制不合理、处理工艺不完善等情况,使得污染物排放指标不符合环保要求^[1]。

分析《城镇排水统计年鉴》可知,城市污水处理厂运行过程中,多采用氧化沟工艺、生物膜、AAO 类型工艺、AO 工艺、活性污泥法以及 SBR 工艺,其中氧化沟工艺、AAO 类型工艺、SBR 工艺应用较为广泛。结合污染物排放标准(如表 1 所示),要求城市污水处理厂积极改进与完善生活污水处理工艺流程,以提高生物脱氮除磷效果为目标,引入并应用多点进水三级 A/O+MBBR 工艺技术。

表 1 城市污水处理厂污染物排放标准 (mg/L)

| 标准 | BOD ₅ | COD | 氨氮 | 总磷 | 总氮 |
|------|------------------|-----|---------|-----|----|
| 一级 A | 10 | 50 | 5 (8) | 0.5 | 15 |
| 一级 B | 20 | 60 | 8 (15) | 1 | 20 |
| 二级 | 30 | 100 | 25 (30) | 3 | / |
| 三级 | 60 | 120 | / | 5 | / |

二、多点进水三级 A/O 和 MBBR 工艺

(一) 多点进水三级 A/O 工艺

多点进水多级 A/O 工艺主要运用活性污泥的基本特征,其具有好氧、厌氧、兼养生物菌群特点,之后在技术人员的管控下,将 1 个处理系统划分成多段 A、O 生物环境,再依据工艺技术要求组合 A、O 段,形成 A/O 周期,取得良好的污水净化效果。其中 A 段指缺氧段、O 段指好氧段,该工艺具有成本低、处理流程简单、抗冲击负荷强、碱度符合要求、曝气系统运行效率高的优势。

多点进水三级 A/O 工艺的技术流程与改良后的 Bardenpho 相接近,结合脱氮要求,将 AO 段增长至三段,再精准分点进水,实现科学分配碳源。实践阶段,以缺氧/好氧为标准排列系统结构,促进硝化菌、反硝化菌稳定生成,如在交替性布置下,不同段的进水有机碳源

充分展开反硝化,使得出水 TN 浓度符合技术标准,为深度脱氮创建有利基础^[2]。

(二) MBBR 工艺

采用 MBBR 工艺处理生活污水时,核心技术要点为在反应池中加入悬浮生物载体,增加微生物的数量、类型,再将生存环境转变为气、液、固三种状态,促使在污水环境中不同载体相互碰撞、剪切,得到更加微小的气泡,进而提高氧气利用率。在此期间,悬浮载体上的微生物得到一层生物膜,且伴随着溶解氧渗透能力的削弱,产生功能菌分置情况,之后在硝化细菌的作用下,得到好氧生物膜。同时,内层也形成厌氧环境,聚集大量的硝化细菌,利用碳源、硝态氮完成反硝化反应,去除 TN。另外,好氧反应器内的载体在曝气池经流化处理后,冲刷已老化的生物膜,更新生物能,使其拥有较高的活性^[2]。

三、多点进水三级 A/O+MBBR 工艺污水处理技术要点

(一) 工艺参数设计

在多点进水三级 A/O+MBBR 工艺中, 共设置 3 座 AO 池, 其中最后一段 AO 池的污水进水量, 直接影响着出水 TN 浓度。为此, 需结合相关规范, 科学设计工艺参数, 计算表达式具体为:

(1) 分段数量。处于等比例进水状态下, 各分段的脱氮效率:

$$\eta = \left(1 - \frac{1}{n} * \frac{1}{1+r}\right) * 100\%$$

式中: r 为污泥回流比, n 为分段数量, η 为脱氮效率。

(2) 流量分配比例。变比例进水状态下, 当前一段产生硝化反应, 之后在缺氧段反硝化, 该出水含量与末端进水比例密切相关, 则流量分配比例表达式为:

$$\eta = \left(1 - \frac{a_n}{1+n+R}\right) * 100\%$$

式中: R 为最后一段回流比, a_n 为最后一段进水比例。

(3) 水力停留时间, 指反应器内污水的平均停留时间, 表达式为:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

式中: Q 为进水流量、 V 为反应池有效容积。

(二) 工艺装置

以三组首尾相连的缺氧池、好氧池为主, 在进水箱底部安装自动加热器, 倘若水箱温度不超过 18℃, 设置将自动启动加热, 并在工艺装置前端设置厌氧池, 底端布设进水口, 连接一级缺氧池进水口、厌氧池出水口, 可采用塑胶管道, 还需在好氧池底部布设盘式微孔膜片, 起到曝气作用, 之后安装电动搅拌器, 且每组下方设置进水口^[3]。如, 安装蠕动泵, 接通原水, 达到多点进水的目的。沉淀池部分, 优先选择竖式沉淀池, 底部连接污泥回流泵, 接通一级缺氧池, 将厌氧池、缺氧池、好氧池的容积比控制在 3.4:3:4。

(三) 工艺设计

(1) 预处理系统。设计 2 道粗格栅, 渠 1m, 配备 2 台钢丝绳式粗格栅除污机、4.5m 长栅渣输送机, 以及旋转式格栅除污机、潜水排污泵、无轴螺旋输送压榨机。

(2) 生化处理系统。以增强生物脱氮除磷效果为目标, 重新设计生化池, 在预缺氧区、厌氧区设置进水点, 提高原水碳源利用率, 保证回流泵的流量。如, 结合生化池的容积、运行条件, 将其划分成不同的区域, 如好氧区分成好氧填料区、缺氧可变区, 为反硝化脱氮创建有利条件, 并设置曝气器、立轴搅拌器, 灵活转换缺氧区、好氧区。同时, 缺氧区与可变区的进水口处设置进水点, 辅以闸门装置, 达到多点灵活进水的目的。

(3) 污泥回流泵站。增设 2 台污泥泵、3 台污泥回流泵。

(四) 污水检测处理内容

依据《水和废水检测分析方法》, 利用多点进水三级 A/O+MBBR 工艺污水处理技术时, 主要检测生活污水中 pH、COD、TN、TP、填料挂膜量、生物相等, 还包含生物膜生物量、高通量宏基因组分析、计算物料平衡。

污水处理时, 可采用碱洗法检测生物膜量时, 需在好氧池内抽取数量为 N 的悬浮调料, 运用离子水冲洗悬浮污泥, 移动至 105℃ 烘箱, 冷却后称取物体重量, 再装入烧杯放入水浴加热锅, 温度设置为 80-100℃, 一边加热一边搅拌, 促使生物膜脱落, 之后取出并清洗悬浮填料, 烘干后记录物品重量, 即可得到悬浮填料生物膜生物量^[4]。

四、基于多点进水三级 A/O+MBBR 工艺的城市生活污水处理技术应用效果

(一) COD 去除效果

应用多点进水三级 A/O+MBBR 工艺技术工程中, 测量进水和出水的 COD, 计算 COD 去除率。结果显示, 在污泥培养驯化到成功挂膜的阶段, 进水 COD 为 389—496mg/L, 出水 COD 浓度由 196mg/L 逐步下降至 29.6mg/L。原因在于, 初期处理阶段微生物浓度偏低, 反应器内污泥的 COD 降解能力较低, 随着时间的延长, 微生物逐步适应污水环境, 显著提高了反应池内污泥浓度, 加快有机物降解速度, 减小 COD 出水量, 使得去除率超过 90%。

(二) 氨氮去除效果

分析工艺去除氨氮效果时, 发现污泥培养到完成挂膜时期, 氨氮进水浓度在 35.8—49.6mg/L 之间, 出水浓度在 2.4—36.4mg/L 之间。污泥接种时, 反应池内污泥浓度偏低, 加之硝化细菌的繁衍周期长, 形成较高的氨氮负荷, 去除率为 21.2%, 超过相关技术标准。之后随着污泥浓度的提高, 消耗大量的进水有机物, 同时因整个过程不需排泥, 延长了反应器内硝化细菌的停留时间, 提高氨氮降解能力。当处于填料挂膜阶段, 已去除 85% 的氨氮, 但检测到出水氨氮浓度为 6.9mg/L, 不符合技术标准。该现象形成原因为: 作为一种自养型细菌, 当硝化细菌进水时异养菌消耗一部分有机物, 形成大量的异养菌, 抑制硝化细菌的生长速度^[5]。

(三) 总氮去除效果

在城市污水体系中, 总氮包含硝化氮、氨氮, 计算排放剩余污泥排除总氮时, 表达式为:

$$M_{TN,was} = Q_W \cdot X_V \cdot f_N$$

式中: f_N 为剩余污泥的含氮百分比, Q_W 为剩余污泥排放量, X_V 为悬浮物浓度, $M_{TN,was}$ 为总氮。

污泥接种至成功挂膜阶段, 总氮进水浓度在 55.4—66.7mg/L 之间, 出水浓度在 7.4—45.6mg/L 之间, 分析相关数据资料可知, 污泥接种时浓度低, 此时微生物尚未适应污水环境, 使得出水总氮下降。

(四) 总磷去除效果

污泥接种至成功挂膜阶段, 总磷进水浓度在 3.93—5.22mg/L 之间, 出水浓度在 1.75—3.25mg/L 之间。分析

相关数据资料可知,污泥接种时,因污泥拥有良好的吸附性能,可吸附污水中磷酸盐,且因污泥浓度较低,负荷高,含有充足的有机物,促使在厌氧环境下聚磷菌能合成糖原、自身能源物质,释放磷酸盐;好氧环境中,聚磷酸吸收并分解磷酸盐,降低出水总磷。

五、城市污水处理厂改造中多点进水三级 A/O+MBBR 工艺的实践应用

(一) 污水处理厂基本情况

污水处理厂建设规模为 3 万 m³/d, 实际处理规模为

表 2 污水处理厂当前水质指标 (mg · L⁻¹)

| 指标 | COD | BOD | 氨氮 | TN | TP |
|-----------|------|------|-------|------|------|
| 设计进水水质 | 500 | 350 | 45 | 70 | 8 |
| 实际进水水质平均值 | 256 | 98 | 36.4 | 60.6 | 5.76 |
| 实际进水水质最大值 | 390 | 116 | 44.7 | 71.5 | 7.71 |
| 设计出水水质 | 50 | 10 | 5 (8) | 15 | 0.5 |
| 实际出水水质平均值 | 27.5 | 4.26 | 1.63 | 10.6 | 0.3 |
| 实际出水水质最大值 | 37.3 | 6 | 1.96 | 14.4 | 0.9 |

(二) 处理工艺流程

进水→粗格栅→提升泵站→细格栅、曝气沉砂池→多点进水三级 A/O+MBBR 工艺→二沉池→高效沉淀池→连续流砂滤池→消毒池→巴氏计量槽→达标排放。

(三) 运行效果与综合效益

1. 运行效果

污水处理厂改造期间,涉及 2 组污水处理系统交替运行改造,同时考虑到污泥活性偏高、驯化速度快,需针对运行工艺流程实行系统性调试,得到改造后实际总进出水质,如表 3 所示。分析表 3 可知,改造后污水处理工艺运行状态良好,主要污染物处理结果均达预期目标,符合《地表水环境质量标准》,TN ≤ 12mg/L。结果显示,TN 去除率为 85.6%,COD 去除率为 93.8%,氨氮去除率为 98.7%,出水水质较为稳定。但值得注意的是,需计算悬浮填料生物膜量,表达式为:

$$M = \frac{(M_1 - M_0)N}{nV}$$

式中:V 为好氧池体积,n 为投加悬浮填料个数,N 为悬浮填料数量,M₀为冷却后的称重质量,M₁为烘干后的悬浮填料质量,M 为悬浮填料生物膜量。

了解去除 1mgCOD 消耗的 NO₃-N, 计算表达式为:

$$\alpha = \frac{2.86(1 + b_H \cdot \theta_c)}{1 + b_H \cdot \theta_c - Y_H(1 + f_D \cdot b_H \cdot \theta_c)}$$

式中:θ_c为污泥龄,f_D为衰减后微生物量,b_H为异养菌衰减系数,Y_H为异养菌真实产率,α为 NO₃-N 消耗量。

表 3 改造后实际总进出水质 (mg/L)

| 参数 | 进水 | 出水 |
|-----|---------|---------|
| COD | 190-280 | 10-21 |
| 氨氮 | 30-40 | 0.5-1.5 |
| TN | 40-60 | 6-10 |
| TP | 4-7 | 0.1-0.2 |

2. 改造效益

本次改造共投入 1499.98 万元,运行成本降低至 0.72

元 /t, 均低于同类型改造项目。其中,污水实际处理量规模达到 3 万 m³/d, 平均每月耗电量为 26 万 kW · h, PAC 消耗量为 105.8t, 碳源为 30.4t。

污染物削减量情况为:COD 年削减量为 5146.5t, 增长 219t; TN 年削减量为 657t, 增长 55t; 氨氮年削减量为 476.33t, 增长 38.33t, 有效降低对周边环境的污染。

结语

总而言之,纵观近年来城市经济的持续发展,生活污水处理技术水平大幅提升,污水处理厂的工艺设备日渐完善。文章结合现阶段生活污水处理现状,提出一种基于多点进水三级 A/O+MBBR 工艺的城市生活污水处理技术,以多点进水三级 A/O、MBBR 工艺为基础,设计工艺参数、生产装置,降低 COD、总氮、氨氮的出水浓度,提高脱氮除磷效果的同时,满足出水标准。未来发展过程中,可在污水处理工艺中融入人工智能、大数据技术,拓宽生物脱氮除磷路径,提高生活污水处理质量。

参考文献

[1] 柳岩,陶素素,张雯,等.MBR 及超滤工艺在老旧污水厂准 IV 类提标中的设计应用 [J]. 水处理技术,2023,49(2):143-148,152.

[2] 乔海兵,赵志太,李帅军,等.污水厂氧化沟改造为 A²O+MBBR+O₃ 工艺提标设计 [J]. 中国给水排水,2023,39(22):60-65.

[3] 杨斯杨,王洋.城市生活污水处理技术的优化与应用研究 [J]. 皮革制作与环保科技,2024,5(13):133-135.

[4] 曾玫菱.探析城市生活用水的水质检测和污水处理技术 [J]. 清洗世界,2024,40(4):115-117.

[5] 乔治强.城市生活污水处理厂生化池进出水暗渠施工技术分析 [J]. 安徽建筑,2024,31(5):33-34.

作者简介

钱荣羊 (1991-),男,安徽省枞阳县,硕士,中级工程师,市政给排水与环保水处理。