

基于AO工艺优化的污水处理厂氮磷同步去除策略研究

刘纪平

山东省菏泽市成武县桑德碧清水务有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14341

[摘要] AO工艺是污水处理中实现氮磷去除的重要技术。通过剖析厌氧、缺氧、好氧环境下氨化、硝化、反硝化及聚磷菌释磷吸磷原理,明确内回流比、污泥回流比、溶解氧浓度、温度、pH值等关键影响因素。基于此,提出精准调控运行参数、优化微生物生长环境、改进工艺结构、强化工艺协同作用等优化策略,旨在提升AO工艺在污水处理厂中氮磷同步去除效能,为污水处理技术优化提供理论与实践参考。

[关键词] AO工艺; 氮磷同步去除; 运行参数调控; 工艺优化; 微生物环境

中图分类号: Q93-31 **文献标识码:** A

Study on synchronous removal strategy of nitrogen and phosphorus in sewage treatment plant based on AO process optimization

Jiping Liu

Chengwu Sandbiqing Water Co., Ltd., Heze City, Shandong Province

[Abstract] AO process is an important technology to realize nitrogen and phosphorus removal in sewage treatment. By analyzing the principles of ammoniation, nitrification, denitrification and phosphorus release and absorption by phosphorus accumulating bacteria in anaerobic, anoxic and aerobic environments, the key influencing factors such as internal reflux ratio, sludge reflux ratio, dissolved oxygen concentration, temperature and pH value were clarified. Based on this, some optimization strategies were put forward, such as accurately regulating operation parameters, optimizing microbial growth environment, improving process structure and strengthening process synergy, in order to improve the simultaneous removal efficiency of nitrogen and phosphorus by AO process in sewage treatment plants and provide theoretical and practical reference for sewage treatment technology optimization.

[Key words] AO process; Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus; Operation parameter control; Process optimization; Microbial environment

引言

随着水体富营养化问题加剧,氮、磷污染物的高效去除成为污水处理领域的关键挑战。AO工艺凭借独特的厌氧-缺氧-好氧环境设计,实现微生物协同作用下的氮磷同步去除,在污水处理厂中广泛应用。然而,工艺运行受多因素制约,优化需求迫切。深入探究其反应原理,解析关键影响因素并提出针对性优化策略,对提升污水处理效能、改善水环境质量具有重要意义。

1 AO工艺中氮磷去除的原理剖析

1.1 厌氧环境下的反应机制

在厌氧池中,其溶解氧需接近0mg/L,为严格绝氧环境。此阶段存在多种复杂的微生物反应。污水中的含氮有机物,如蛋白质、尿素等,在氨化细菌的作用下开始氨化反应。氨化细菌多为异养菌,在适宜条件下,将含氮有机物分解为氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$

或 NH_4^+)。从反应动力学角度来看,在25-35℃的温度区间、pH值处于中性至微碱性范围、水分含量在50-60%、底物碳氮比例维持在20:1-30:1时,氨化细菌活性较高,氨化反应速率较快。同时,聚磷菌在厌氧环境下,因缺乏氧气作为电子受体,会分解细胞内的聚磷酸盐,将磷以正磷酸盐(PO_4^{3-})的形式释放到污水中,这个过程会产生能量,聚磷菌利用此能量吸收污水中如挥发性脂肪酸(VFA)等易降解的小分子有机物,并将其转化为聚β羟丁酸(PHB)储存于细胞内,为后续在好氧环境下过量吸磷做准备。据研究,厌氧条件下释放1mg磷吸收储存的有机物,经后续好氧分解后产生的能量可使聚磷菌吸收2-2.4mg的磷。

1.2 缺氧环境下的脱氮反应

缺氧池内溶解氧含量一般在0-0.5mg/L之间,缺乏分子氧但存在其他氧化性物质。当内回流液将好氧池产生的亚硝酸盐(NO

NO_2^- 和硝酸盐(NO_3^-)带入缺氧池后,反硝化细菌在此环境下发挥关键作用。反硝化细菌属于异养兼性厌氧菌,在缺氧条件下,它们以污水中的有机碳源为电子供体,以 NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体进行缺氧呼吸。其反应过程可简单表示为: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ 。在这个过程中,反硝化细菌利用碳源的能量,逐步将硝态氮还原为氮气,从污水中逸出,从而实现脱氮。然而,实际运行中,缺氧区反硝化过程常面临碳源不足的问题,为解决此问题,通常采用内回流技术,将好氧反应器O池中的部分出水回流到缺氧反应器A池,一般内回流比在200%-400%较为常见,以此为反硝化提供充足的硝态氮和相对适宜的碳氮比,提升脱氮效率。

1.3 好氧环境下的硝化与吸磷反应

好氧池为微生物提供充足的氧气,溶解氧一般需维持在2-4mg/L。在好氧条件下,硝化反应分两个阶段进行。首先,亚硝酸菌将氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$ 或 NH_4^+)氧化为亚硝酸盐(NO_2^-),其反应方程式为: $2\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{HNO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$;接着,硝酸菌将亚硝酸盐(NO_2^-)进一步氧化为硝酸盐(NO_3^-),反应方程式为: $\text{HNO}_2 + 1/2\text{O}_2 = \text{HNO}_3$ 。传统认知中,硝化反应由这两类细菌顺序完成,但2015年发现的短程硝化细菌打破了这一传统观念,它们可使氨氮直接转化为硝态氮。同时,好氧环境下聚磷菌会大量摄取污水中的磷^[1]。由于在厌氧阶段聚磷菌吸收并储存了有机物,此时在好氧环境下,聚磷菌分解体内的PHB产生能量,用于细胞的合成代谢和过量摄取磷,形成高含磷量的聚磷菌细胞。这些聚磷菌随着剩余污泥排出系统,从而实现污水除磷。

1.4 A0工艺中氮磷去除的协同关系

在A0工艺中,厌氧、缺氧和好氧环境相互协同,共同完成氮磷去除。厌氧阶段氨化细菌产生的氨氮,经好氧阶段硝化细菌作用转化为硝态氮,硝态氮通过内回流进入缺氧区,在反硝化细菌作用下实现脱氮。而厌氧阶段聚磷菌释放磷并储存有机物,好氧阶段利用储存的有机物能量过量吸磷并随剩余污泥排出除磷。整个过程中,不同微生物菌群在各自适宜的环境下发挥作用,且各阶段之间物质传递和转化紧密关联。例如,好氧阶段产生的硝态氮若不能及时通过内回流进入缺氧区,会导致硝态氮在好氧池积累,影响硝化反应的持续进行;同时,厌氧阶段聚磷菌对有机物的储存量,会直接影响好氧阶段其吸磷能力。这种协同关系的稳定维持,是A0工艺实现高效氮磷同步去除的关键。

2 A0工艺运行中影响氮磷同步去除的关键因素

2.1 内回流比的影响机制

内回流比指的是从曝气池末端回流至缺氧池前端的硝化液流量与进水流量的比值。其主要作用在于将曝气池中产生的硝态氮输送至缺氧池,为反硝化细菌提供必要的电子受体,以此达成脱氮目标。通常情况下,内回流比与脱氮效果存在正相关关系,较高的内回流比意味着更多硝态氮被带回缺氧区,从而推动反硝化反应。然而,内回流比并非越高越好。当内回流比超出一定范围,例如高于600%时,会致使缺氧区溶解氧含量上升,破坏缺氧环境,抑制反硝化细菌的活性。同时,过高的内回流比还会缩短混合液在缺氧池的停留时间,不利于反硝化反应充分进

行^[2]。相反,若内回流比过低,硝态氮无法足量回流至缺氧区,反硝化反应不彻底,进而降低总氮去除率。此外,内回流比的变化还会影响生化池中溶解氧的分布与消耗,改变污泥在各反应区的循环速度及与污水的接触效率。

2.2 污泥回流比的作用及影响

污泥回流比即二沉池沉淀后的部分活性污泥回流至曝气池前端(AAO工艺回流到厌氧池,MBR工艺回流到好氧池)的流量与进水流量的比值。其核心目的是补充曝气池中持续流失的活性污泥,确保曝气池中维持充足的活性污泥浓度。污泥回流比直接关联曝气池中污泥浓度,当污泥回流比增大,更多活性污泥回流至曝气池,使得污泥浓度上升;反之,污泥浓度则下降。这一变化会对微生物群落结构产生间接影响,不同的污泥龄适配不同生长特性的微生物。而且,污泥浓度的改变会影响微生物对有机物的分解及耗氧情况。污泥回流比提高,微生物数量增加,分解有机物耗氧增多,若曝气量未相应调整,微生物活性将受抑制。同时,污泥回流比不当还会影响二沉池的水力负荷、污泥沉淀效果以及出水水质,例如回流比过大导致二沉池水力负荷增加、污泥难沉淀,过小则使污泥在二沉池停留时间过长易厌氧上浮。

2.3 溶解氧浓度的关键作用

在A0工艺中,不同反应阶段对溶解氧浓度有着特定要求。厌氧区需严格控制溶解氧接近0mg/L,为聚磷菌释磷及氨化细菌的氨化反应提供适宜环境;缺氧区溶解氧一般维持在0-0.5mg/L,保障反硝化细菌以硝态氮为电子受体进行脱氮反应;好氧区则需充足的溶解氧,通常控制在2-4mg/L,满足硝化细菌将氨氮氧化为硝态氮以及聚磷菌过量吸磷的需求。若厌氧区溶解氧超标,聚磷菌的释磷过程会受到抑制,影响后续好氧阶段的吸磷效果;缺氧区溶解氧过高,反硝化细菌的活性会被削弱,脱氮效率降低;好氧区溶解氧不足,硝化反应无法充分进行,氨氮去除率下降,同时聚磷菌吸磷能力也会减弱^[3]。此外,溶解氧浓度还会影响微生物的生长代谢和活性,不同微生物对溶解氧的耐受范围不同,合适的溶解氧浓度是维持微生物正常功能的关键。

2.4 温度与pH值的影响效应

温度对A0工艺中微生物活性影响显著。适宜的温度范围在15-35℃,在此区间内,氨化细菌、硝化细菌、反硝化细菌以及聚磷菌等微生物的活性较高,能够高效地进行各自的代谢反应,促进氮磷去除。当温度低于15℃时,微生物的酶活性降低,代谢速率减缓,例如硝化细菌的硝化反应速率明显下降,导致氨氮去除效果变差;反硝化细菌的反硝化能力也会受到抑制,影响总氮去除。而温度高于35℃时,部分微生物可能会受到热胁迫,生长和代谢受到阻碍。pH值同样对微生物活性有重要影响,一般来说,A0工艺适宜的pH值范围在6.5-8.5。在厌氧阶段,pH值在中性至微碱性时,氨化细菌活性较高,有利于氨化反应。好氧阶段,硝化细菌适宜在弱碱性环境下生长,pH值偏离此范围会影响其对氨氮的氧化能力;聚磷菌在中性偏碱环境下对磷的摄取能力较强。若pH值过低或过高,都会改变微生物细胞内酶的活性中心结构,影响酶与底物的结合,从而降低微生物对氮磷的去除效率。

3 基于原理和影响因素的AO工艺优化策略

3.1 运行参数的精准调控

内回流比应依据进水水质中氮含量以及处理目标灵活调整。在进水氨氮含量较高时,适当提高内回流比,可将更多硝态氮输送至缺氧区,为反硝化提供充足底物。例如,当进水氨氮浓度高于50mg/L,内回流比可从常规的200%-400%提升至400%-600%。同时,需借助在线监测设备实时监控缺氧区溶解氧,防止因内回流比过高导致溶解氧超标,影响反硝化效果。对于污泥回流比,可根据曝气池中活性污泥浓度和二沉池的沉淀情况进行动态调控。当曝气池中活性污泥浓度低于3000mg/L时,适当增大污泥回流比,补充活性污泥,增强处理能力;若二沉池出现污泥上浮等沉淀异常现象,可适当降低污泥回流比,减少水力负荷,改善沉淀效果。溶解氧浓度的控制需按不同反应阶段严格执行。厌氧区采用严格绝氧措施,如优化密封装置,确保溶解氧接近0mg/L;缺氧区通过调节曝气量或搅拌强度,维持溶解氧在0-0.5mg/L;好氧区则借助溶解氧传感器与曝气设备联动,将溶解氧稳定在2-4mg/L。

3.2 微生物生长环境的优化

温度方面,可在处理设施外部增设保温材料,减少热量散失,维持处理系统内温度在微生物适宜生长的15-35℃区间。当冬季水温低于15℃时,可考虑采用加热装置,如在进水管或反应池中安装热交换器,适当提升水温。对于pH值的调节,若进水pH值低于6.5,可在厌氧区或好氧区投加适量碱性物质,如石灰(CaO)或氢氧化钠(NaOH),提升系统pH值;若pH值高于8.5,则可投加酸性物质,如硫酸(H₂SO₄)来调节^[4]。在调节过程中,需利用pH传感器实时监测,避免pH值波动幅度过大对微生物造成冲击。同时,注重碳源的合理补充,当碳氮比低于4:1时,可添加易降解的碳源,如乙酸钠(CH₃COONa),为反硝化细菌和聚磷菌提供充足的能量来源,促进其生长和代谢。

3.3 工艺结构的改进

合理调整厌氧、缺氧、好氧池的容积比,以适应不同水质污水的处理需求。若污水中含氮有机物较多,可适当增大缺氧池容积,延长反硝化反应时间,提高脱氮效率;对于磷含量较高的污水,则增大厌氧池容积,强化聚磷菌释磷过程,为后续好氧吸磷创造条件。例如,对于城市生活污水,通常厌氧、缺氧、好氧池容积比为1:1:3较为适宜;若工业废水中氮含量高,可将容积比

调整为1:2:3。同时,优化各反应区之间的连接方式和水流流态,如采用推流式与完全混合式相结合的流态,减少短流现象,增强污水与微生物的充分接触。在各反应区之间设置导流板或折流板,引导水流按预定路径流动,提高反应效率。

3.4 强化工艺的协同作用

通过优化内回流和污泥回流路径,增强厌氧、缺氧、好氧阶段之间的物质传递和微生物循环。例如,将内回流液精准地引入缺氧区前端,使硝态氮与反硝化细菌充分接触;合理规划污泥回流路线,确保活性污泥在不同反应区之间有序循环,维持各区域微生物数量和活性的稳定^[5]。此外,采用智能控制系统,将水质监测数据、运行参数以及设备运行状态进行整合分析,实现对AO工艺的实时监控和动态调整。根据水质水量的变化,自动调节内回流比、污泥回流比、曝气量等参数,使整个工艺系统始终处于高效运行状态,强化各阶段之间的协同作用,从而实现氮磷同步高效去除。

4 结语

AO工艺在污水处理厂氮磷同步去除中占据重要地位。通过明晰其氮磷去除原理,掌握内回流比、温度等关键影响因素,采取精准调控运行参数、优化微生物环境等策略,可有效提升工艺性能。未来,持续优化AO工艺,将为污水处理事业提供有力技术支撑,助力缓解水体污染,守护水生态环境,推动水资源可持续利用。

[参考文献]

- [1]贺达.AAO工艺优化与智能化管理在污水处理厂中的协同效应研究[J/OL].清洗世界,1-5[2025-04-30].
- [2]周传,黄鹤,魏欣,等.重庆市某城镇污水处理厂CASS工艺优化研究[J].科技与创新,2024,(22):116-118.
- [3]罗凡,于翔,李浩,等.敏感地区城市污水处理厂工艺优化模拟及生产线应用[J].环境工程学报,2024,18(09):2596-2604.
- [4]马九利,王伟,黄继会,等.城镇污水处理厂可调节式AAO工艺优化运行实践[J].中国给水排水,2023,39(17):70-73.
- [5]岳志豪.城镇污水处理厂污泥好氧堆肥发酵中氮的吸收工艺优化研究[D].郑州大学,2022.

作者简介:

刘纪平(1983--),男,汉族,山东省菏泽市人,大专,研究方向:污水处理。