

短程反硝化污水处理技术在市政给排水设计中的应用

文 / 陈浩楠 安徽省城乡规划设计研究院有限公司

摘要：短程反硝化污水处理技术在能耗、环保、效率等方面具有优势，故可将其运用到市政给排水项目中，对污水处理环节优化设计。基于此，文章采用案例研究法，结合某市政给排水项目展开具体分析，讨论了市政给排水设计中的短程反硝化污水处理技术应用思路，并从多角度出发，以市政给排水优化设计为目标，提出了短程反硝化污水处理技术的应用要点，包括精准评估水质特性、科学设计工艺路线、精细控制核心参数、反应器选型配置、部署智能监测系统。

关键词：短程反硝化；污水处理技术；市政给排水设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.121

引言

市政给排水项目中以往所运用的生物脱氧工艺存在能耗大、碳源需求高等缺陷，不符合“双碳”战略目标，为实现可持续发展，可运用短程反硝化污水处理技术代替以往生物脱氧工艺。短程反硝化技术能够与厌氧氨氧化技术耦合，有选择地将硝酸盐还原至亚硝酸盐，并停滞在该阶段，将其运用到市政给排水设计中，则会大幅提高市政污水处理效能。

一、项目概况

某地区的市政给排水污水处理系统面临巨大压力，原有工艺已难以满足当前的环保要求以及区域水环境容量限制要求，并产生了碳源不足、能耗过高、高氮负荷冲击等复杂现象。为解决该问题，经批准后建立了市政给排水提标扩容项目，旨在对该市政给排水体系中的污水处理工艺进行优化设计，实现污水高效节能处理的同时，保障区域水环境。

在该市政给排水设计项目中，主要面临的污水处理难点主要表现为三个方面。其一，低碳高氮，碳氮比失衡，进水中混有部分低碳源的工业废水，导致常规生化处理中反硝化过程所需电子供体不足，成为高效脱氮的主要限制因素。其二，水质水量波动剧烈，受季节性降雨和区域工业排水周期性影响，进水流量与污染物浓度变化系数大，对处理工艺的抗冲击负荷能力提出极高要求。其三，传统外碳源投加费用高昂，且可能导致出水中残留有机物超标，如何在保证脱氮效率的同时大幅降低药耗与能耗是本项目设计的重大挑战。案例市政给排水项目的设计处理规模约为10万m³/d，为解决现阶段该地区存在的市政给排水污水处理难题，决定采用短程反硝化污水处理技术，该技术与厌氧氨氧化技术耦合，可在保障污水处理效果的同时，实现节能降耗目标。

二、市政给排水设计中的短程反硝化污水处理技术应用思路

案例市政给排水设计项目选用短程反硝化技术颠覆了以往的污水处理工艺，改变了原有的工艺体系，旨在全程反硝化有目的地进行控制，继而形成一条兼顾节能与效率的新技术路径。但短程反硝化污水处理技术在市政给排水设计中的应用并非简单的设施调整，更需承前

启后地对市政给排水污水处理体系优化设计，因此，需根据市政给排水项目目标，对短程反硝化污水处理技术的应用思路进行梳理。

结合案例市政给排水项目来看，需建立以短程反硝化为核心的污水处理脱氮策略，将短程反硝化的代谢产物——亚硝酸盐不再视为有害中间物，而是作为反应基质，有意识地控制反硝化过程停滞在亚硝酸盐阶段，并将其稳定产出，为后续的厌氧氨氧化过程提供必需的底物。由此，工艺设计从传统的工艺结构转变为“短程硝化-短程反硝化-厌氧氨氧化”多元协同的崭新架构。这一思路的本质是构建一条内源驱动的脱氮主通道，大幅减少对溶解氧和有机碳源的依赖，减少了硝化能耗与外加碳源药耗，继而可破解本项目低碳氮比和高运行成本的核心难题。此外，该工艺技术设计时还需能够良好适应水质波动情况，短程反硝化微生物具有良好的环境韧性，其代谢途径可控，能够为水质变化提供了操作窗口，由此肯定了短程反硝化污水处理技术在市政给排水项目中的应用价值。

从设计角度来看，不可过于追求在绝对稳定的理想条件下运行，而是通过创造一种“动态平衡”的环境，使得即使在进水碳源种类或浓度波动时，系统仍能通过内在微生物群落竞争和代谢调控，优先将硝酸盐转化为亚硝酸盐而非氮气。这种思路赋予了整个处理工艺更强的鲁棒性，使其能够将上游水质的不稳定性“消化”并转化为相对稳定的亚硝酸盐流，从而保障下游单元的持续高效运行，最终实现整个系统在真实复杂工况下的出水稳定达标^[1]。

三、基于市政给排水设计的短程反硝化污水处理技术应用要点

（一）精准评估水质特性

为确保短程反硝化污水处理技术可被良好嵌入到市政给排水项目中，开展一场为期至少12个连续月的水质特性解析工作，全面获取设计所需的原始参数，为短程反硝化污水处理技术工艺的设计奠定基础。

具体实施期间，精细化采集水质数据，在进水总管、关键节点处布设采样点，每4h采集1次混合样，用于分析日均浓度；在高峰排水时段每1h进行1次瞬时样采

集,持续 72h,用于了解短时冲击负荷情况;当降雨量 > 15mm/h 后,则每间隔 30min 启动 1 次应急采样,持续至降雨结束后 6h,用于分析合流制溢流水质特征。水质特性评估期间主要的监测指标除常规 COD(化学需氧量)、BOD₅(五日生化需氧量)、NH₃-N(氨氮)、TN(总氮)、TP(总磷)、SS(悬浮物)外,还包括可生化降解 COD、溶解性 COD、颗粒性 COD、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮以及碱度的定量分析。

完成水质样本获取后需进一步展开组分分析与可生化性评价。在案例市政给排水项目中,运用快速测定仪对 COD 进行检测,操作流程如图 1 所示,采用物理化学方法将总 COD 区分为惰性溶解性 COD、惰性颗粒性 COD、易生物降解 COD 和慢速生物降解 COD。其中,易生物降解 COD 的浓度至关重要,通过滴定法或色谱法进行定量,目标获取其精确值及其在总 COD 中的占比。同时,开展 BOD₅/COD 比值测定,并进一步通过呼吸计量法测定其最大比耗氧速率,量化碳源的可利用速率。针对脱氮核心,需精确测定 C/N 比,此处“C”特指可用于反硝化的碳源,而非总 COD。完成上述操作后,进行动态负荷与毒性物质评估,基于全年水文数据,统计分析进水流量与污染物浓度的时变化系数、年变化系数、日变化系数,绘制全年负荷变化曲线^[2]。

(二) 科学设计工艺路线

案例市政给排水项目的设计核心在于构建一套可行的短程反硝化污水处理工艺技术路线,在该过程中,案例项目摒弃简单的单元叠加,采用基于功能分区的一体化集成设计理念,确保生化反应在时空上高效衔接。

采用前置反硝化改良型工艺作为主体框架,并精准植入短程反硝化耦合厌氧氨氧化核心单元。设计期间,

将生物池严格划分为预反硝化区、主微氧短程硝化区、短程反硝化耦合厌氧氨氧化区、后置抛光区。污水、超高浓度硝酸盐回流液首先进入预反硝化区,利用进水碳源快速去除部分硝态氮,减轻后续主体工艺负荷。随后,污水进入主微氧区,在此通过低溶解氧环境筛选抑制硝酸菌,实现稳定高效的氨氧化菌主导的短程硝化,将约 50% 的氨氮转化为亚硝酸盐。此后,混合液进入核心的短程反硝化耦合厌氧氨氧化区,内部投加悬浮型或附着型厌氧氨氧化菌载体,创造有利于短程反硝化菌成为优势菌群的生态位,确保将来自回流液的硝酸盐和微氧区来的亚硝酸盐共同作为底物,由短程反硝化菌主导将其部分还原为亚硝酸盐,随即由厌氧氨氧化菌利用氨氮和新生成的亚硝酸盐进行脱氮。

在此基础上,设计多级内回流系统,用于实现物料的高效定向传输。为实现反应底物和产物的精准分配,设置多级内回流。具体来看(1)短程反硝化耦合厌氧氨氧化区混合液至主微氧区回流,将未反应完全的氨氮和生成的硝酸盐返回微氧区继续反应。(2)主微氧区混合液至预反硝化区回流,将富含亚硝酸盐氮的混合液部分回流至前端。(3)系统末端至短程反硝化耦合厌氧氨氧化区的硝酸盐专属回流,通过独立泵管将二沉池前富含硝酸盐氮的出水加压回流至短程反硝化区,作为短程反硝化菌的核心底物。(4)短程反硝化耦合厌氧氨氧化区至预反硝化区的少量回流,以维持整个系统污泥浓度的均衡。最后,设置旁路化学除磷与应急保障单元,在生化系统末端独立设置高效沉淀池,并配备基于“前馈——反馈控制”的化学除磷药剂自动投加系统(如图 2 所示),根据在线总磷仪表实时数据精准投加,确保总磷稳定达标^[3]。

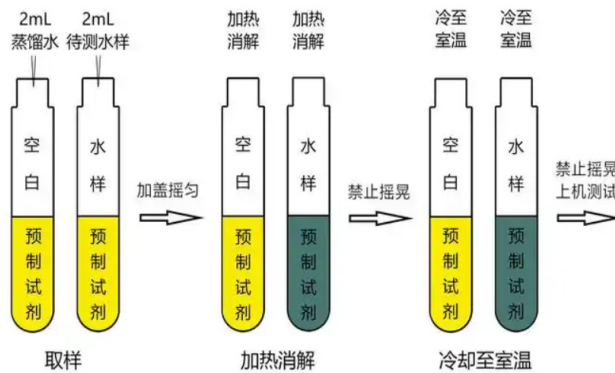


图 1 COD 快速测定操作流程

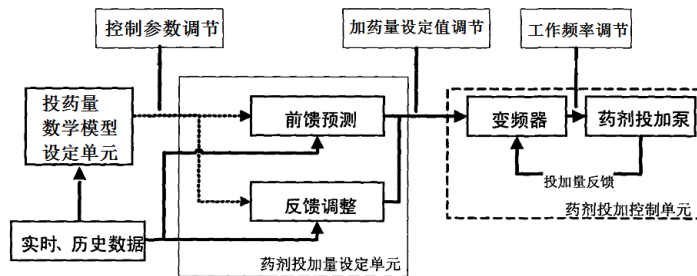


图 2 化学除磷药剂自动投加系统

(三) 精细控制核心参数

为确保短程反硝化系统稳定高效运行,需对关键工艺参数实施精细化调控。本项目采用基于在线监测与自动控制的精准控制策略,确保各反应单元处于最佳运行状态。

案例市政给排水设计项目实施分区段溶解氧精确控制,在主微氧短程硝化区,通过高精度在线监测仪与鼓风机变频系统联动,将溶解氧严格控制在 $0.3\sim 0.5\text{mg/L}$ 范围内,创造有利于氨氧化菌而抑制硝酸菌的环境。采用前馈-反馈复合控制模式,以进水氨氮负荷为前馈信号,实时溶解氧值为反馈信号,动态调节曝气量。在短程反硝化耦合厌氧氨氧化区,确保溶解氧低于 0.1mg/L ,安装超低量程监测仪,设置机械搅拌与回流条件,避免氧气侵入抑制菌种活性。此外,对碳氮比精准调控,在短程反硝化区入口处,安装在线硝酸盐氮和总有机碳分析仪,实时监测进水负荷,动态计算碳氮比。通过可编程控制器将碳氮比稳定在 $2.5\sim 3.5$ 之间。当监测值低于设定范围时,自动启动碳源投加系统,根据模型计算的碳源缺口,以精确流量进行瞬时补偿投加,确保碳源供给准确匹配工艺需求。在此基础上,对亚硝酸盐积累率与污泥龄协同控制。在短程反硝化区出口安装在线紫外光谱分析仪,实时监测亚硝酸盐积累率,维持在 $60\%\sim 80\%$ 最佳范围。通过监测各功能区污泥浓度,将系统污泥龄控制在 $25\sim 30\text{d}$,确保厌氧氨氧化菌富集,维持微生物群落平衡^[4]。

(四) 反应器选型配置

为确保短程反硝化工艺高效稳定运行,案例项目采用组合式反应器配置方案。针对预反硝化区和主微氧短程硝化区,选用推流式活性污泥反应器,采用廊道式设计,有效水深 $6\sim 7\text{m}$,保证理想推流状态。配置微孔曝气系统,氧利用率 $28\%\sim 32\%$,末端设内循环通道维持污泥浓度。此外,核心的短程反硝化耦合厌氧氨氧化单元采用复合式生物膜-活性污泥反应器,设计为完全混合式,有效水深 8m ,水力停留时间 $8\sim 10\text{h}$ 。投加悬浮生物填料,填充率 $30\%\sim 35\%$,比表面积大于 $500\text{m}^2/\text{m}^3$,为功能菌提供良好附着环境,底部设置低速潜水搅拌机,确保填料均匀悬浮。此外,配套设置径向流高效沉淀池,表面负荷 $0.8\sim 1.0\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$,配备全桥式刮泥机和污泥浓度监测仪。出水设紫外线消毒渠,确保出水水质达标。所有反应器采用碳钢防腐材质,内壁防腐涂层厚度不小于 $500\mu\text{m}$,外部包覆保温层确保冬季运行温度。在此基础上还需增设各种控制仪表,包括pH计、氧化还原电位仪、温度传感器等,实现全过程自动化控制。通过优化反应器结构和运行参数,确保系统在处理效率、运行稳定性和能耗方面达到最佳平衡。

(五) 部署智能监测系统

为实现短程反硝化工艺的精细化管理和智能控制,案例项目构建了一套多层次智能监测系统。该系统基于物联网架构,通过分布式传感器网络、边缘计算网

关和云平台三级体系,实现全过程数据采集与智能分析^[5]。

系统在关键工艺节点布置水质在线监测仪表,包括进水端的化学需氧量、氨氮、总氮传感器,短程硝化区的溶解氧和氧化还原电位探头,短程反硝化区的硝酸盐氮和亚硝酸盐氮分析仪,以及出水端的总磷和悬浮物监测设备。所有仪表采用模块化设计,配备自动清洗和校准功能,确保测量数据准确可靠。监测数据通过工业以太网传输至中央控制室,采样频率可根据工艺要求设置在 $1\sim 5\text{min}$ 区间。在此基础上,基于机器学习算法开发工艺智能诊断系统,通过对历史运行数据训练,建立关键参数预测模型。系统实时分析亚硝酸盐积累率、碳氮比等核心指标的变化趋势,当检测到异常工况时自动触发预警机制。智能控制系统根据进水负荷变化,采用模糊PID算法动态调节曝气量、回流比和碳源投加量等运行参数,实现工艺的自适应优化。此外,建立数字孪生平台,通过三维建模实时可视化展示各构筑物运行状态。平台集成水力模型、生化反应动力学模型和设备能耗模型,支持工艺方案的模拟仿真和优化预测。

结语

综上所述,与传统生物脱氧工艺相较,短程反硝化污水处理技术更具优势,故案例市政给排水设计项目中,经综合考量后,最终选用短程反硝化污水处理技术代替传统的生物脱氧技术。为保障给排水设计有效性,对该项目中水质特性精准评估,科学规划设计污水处理工艺路线,对其中的关键参数精细化管控。并根据市政给排水设计项目实际情况完成反应器的选型与配置,部署智能化监测系统,由此则可完成市政给排水短程反硝化污水处理工艺的设计,为市政给排水项目的可持续运行奠定基础。

参考文献

- [1] 李萍. 污水深度处理与回用技术在市政给排水系统中的应用前景[J]. 中国资源综合利用, 2025, (05): 168-170.
 - [2] 张婷, 张亮, 张璐晶, 等. 短程反硝化厌氧氨氧化生物膜技术在分散式污水处理的应用研究[J]. 给水排水, 2025, (05): 49-54+60.
 - [3] 孙志国, 张萌, 肖成才. 短程硝化反硝化技术在污水处理厂节能改造中的应用[J]. 化学工程与装备, 2025, (02): 29-31+53.
 - [4] 蒲嘉懿. 市政给排水设计中污水处理关键技术相关思考[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (01): 184-186.
 - [5] 黄长在. 市政给排水设计中短程反硝化污水处理技术的应用[J]. 江西建材, 2023, (11): 375-376+379.
- 作者简介: 陈浩楠(1989年-), 男, 汉族, 安徽亳州人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为水处理工艺研究及市政给排水设计。