

城镇污水处理厂升级改造的 脱氮除磷工艺优化

马 磊

(中沙(天津)石化有限公司, 天津 300270)

摘 要 随着水污染防治工作的持续推进,城镇污水处理厂正面临着脱氮除磷较高标准和运行稳定性的双重考验。为了满足水质水量波动环境下升级改造的需要,本文基于脱氮除磷过程核心调控要求,对碳源负荷、C/N 波动、回流比配置和污泥管理的影响机理进行系统分析,并以提升反应耦合效率和系统适应性为目标,提出了针对性工艺优化策略,以期城镇污水处理厂的工艺升级和高效稳定运行提供有益参考。

关键词 脱氮除磷; 污水处理升级; 碳源调控; C/N 比例; 反硝化

中图分类号: X799

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.025

0 引言

随着国家及地方污水排放标准的持续收紧,城镇污水处理厂升级改造进入以深度脱氮除磷为主导的阶段。总氮、总磷成为主要的约束指标,传统的以去除有机物为主的生化系统在反应耦合、负荷适应性、动态调控能力等方面已经不能满足高标准运行的要求。由于降雨稀释、工业水混入和居民用水周期的影响,进水水质波动很大,C/N 比例失衡、瞬时流量突变等现象经常出现,使硝化、反硝化和生物除磷链条容易发生断链和效能下降^[1]。因此,升级改造必须从机理上重新审视碳源利用、C/N 调节、回流配置、污泥管理等关键变量,通过构建可控碳补给、动态参数调节、优化回流结构等方式形成适应多变工况、保持反应稳定性和耦合效率的技术体系,为长期、连续、稳定的达标提供可靠保障。

1 脱氮除磷工艺要求

1.1 满足排放标准下的同步脱氮除磷耦合控制需求

随着《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)对一级 A 标准的深入执行,污水中的总氮(TN)和总磷(TP)的排放控制已经上升为污水处理系统的主要运行目标。以去除有机物为主要目的的传统工艺模式已经很难支持同步脱氮除磷这一复杂的生化反应,尤其当 C/N 不平衡,水温波动以及负荷不稳定时,更容易发生系统崩解或者运行效率大幅下降。因

此该工艺系统要求功能结构中硝化、反硝化和生物除磷三者之间的有效协同作用,同时具有对各个反应阶段溶解氧浓度,碳源分布和污泥龄等参数进行精细调节的功能。为了适应同步控制运行需求,需要对 A²/O、改良型 UCT、五段 Bardenpho 以及其他具有多级反应区及灵活内部回流路径以保证良好氧气供应的生物处理工艺进行优化、缺氧和厌氧环境分布稳定,通过过程控制系统达到 DO、ORP、TN/TP 核心参数实时动态调整,以构建可持续、可调、可扩展的耦合反应系统^[2]。

1.2 适配多变进水水质与水量的动态调节能力

由于降雨径流,工业混入水和居民用水规律的改变,城镇污水处理厂进水流量在时间和空间上表现出明显的波动,特别是雨季、节假日和夜间低谷时段,其表现更显复杂。这种动态负荷给处理系统响应速度和稳定性带来了严重挑战,易造成反硝化碳源短缺,生物除磷断链和系统短流。所以脱氮除磷工艺需要具有优良的水力缓冲能力和生化调节弹性并能实现高、低负荷之间快速切换及精准响应^[3]。设计中需要将调节池或者均质预处理单元引入进水端以稳定瞬时流量和水质的波动;生物反应段通过建立多点进水,碳源补给和可变回流比调节机制使反应区间负荷动态平衡;在操作控制上需要依赖于 SCADA 等先进的智能系统,并结合实时的在线监测数据来进行模型的预测和工艺参数的调整,以确保在复杂的水力环境中,系统仍能保持高效的脱氮和除磷效果。

作者简介: 马磊(1989-),男,本科,助理工程师,研究方向:水处理。

2 城镇污水处理厂升级改造的脱氮除磷工艺的影响机制

2.1 碳源负荷变化对反硝化过程的影响机制分析

反硝化反应作为一种利用有机碳源作为电子供体把硝酸盐还原成氮气的关键性生化过程，该反应运行效率对碳源数量和可利用性具有很大的依赖性。在城市污水处理中，进水中可生化性碳源（挥发性脂肪酸、乙酸盐等）浓度波动显著，直接影响反硝化菌的代谢活性与速率。研究表明：当碳源浓度小于C/N比值为5:1时会显著降低反硝化速率，缺氧区硝酸盐与亚硝酸盐残留量升高，既抑制了随后反应段的进行，也会扰乱微生物群落结构。碳源负荷的突降会使系统缺乏电子供体，导致反硝化脱氮链断裂，并增加反硝化过程中产生温室气体（ N_2O 等）的风险。同时，过量碳源容易触发反硝化区溶解氧反弹及丝状菌扩张，给系统稳定性带来新的扰动。所以在碳源负荷动态波动的背景下反硝化过程对于碳源浓度，可生化性和投加位置等参数的改变异常敏感，成为影响脱氮效率提高的第一机理^[4]。

2.2 进水C/N比例波动对系统脱氮效率的制约作用

进水碳氮比（C/N）被认为是一个关键指标，用于量化污水中可用于反硝化反应的碳源与氮负荷之间的相互关系。脱氮工艺取决于适宜的C/N比，以保持硝化和反硝化过程稳定地协同进行。实际操作时C/N比表现出周期性的波动或者突变，特别是工业废水的掺入，雨季的稀释或者生活污水迟早峰谷交替的作用，C/N比可能骤降至4以下，远低于反硝化过程的最小要求（一般为5~8）。C/N较低时反硝化效率显著降低，造成硝酸盐与亚硝酸盐累积于出水，还会影响同步除磷中聚磷菌碳源竞争力。另外，C/N波动对于活性污泥中菌群结构存在选择压力，这可能会导致反硝化细菌不足，从而减弱系统缓冲水质波动的能力。改造时，若不对C/N的波动趋势进行合理的预判和动态调节机制的引入，很容易导致脱氮过程的“断链”不稳定，从而影响出水的总体达标率。

2.3 回流比与硝化反应时间对硝化率的协同干扰

以氨氮为底物开展硝化反应，在好氧状态下，由诸如亚硝化单胞菌、硝化杆菌等硝化细菌将其转变为硝酸盐的生化过程，回流比与反应时间二者共同左右着其效率，恰当的内回流比可以让反硝化区未充分转化的硝态氮回流至前端反应区二次利用，可在绝大多数污水厂处，回流比与硝化反应时间的协调性弱，造

成硝化效率稳定性欠佳。若内回流比超过300%的界限，即便系统可加大反硝化碳源的利用力度，但有可能造成好氧区的溶解氧负荷过高，硝化菌生存的压力不断上升，于是反向妨碍硝化反应的有序开展；若反应时间低于理论硝化时间，会因氨氮未得到充分氧化，进而降低总氮去除率，若同步脱氮系统的反应时间与回流强度无法精准匹配，会导致硝化链条出现“超负荷”“短栓流”共存局面，从而对工艺耦合节奏产生干扰，引发氨氮残留与亚硝酸盐积累现象频繁显现，干扰了系统的平稳运作^[5]。

2.4 剩余污泥管理对生物除磷活性的间接影响

在生物除磷的过程中，聚磷菌（PAOs）在厌氧环境下释放磷并储存碳，然后在好氧环境下摄取磷来合成多聚磷酸，从而达到全面去除磷的目的。但该工艺的连续平稳运行给剩余污泥管理带来隐性要求。如果排泥的频率不够，或者系统污泥的年龄过长，这将导致GAOs（糖元累积菌）等竞争性菌群的增殖，抑制PAOs的优势地位，从而降低除磷的效率；而且污泥的年龄太短也会使功能菌群还未富集完就排出体外，构成活性不足的问题。根据数据分析，当污泥的年龄在6天以下或超过25天时，生物除磷系统的TP去除效率可能会减少10%~20%。另外，污泥中磷的累积会给系统总磷负荷带来反向压力，如果不及时排出污泥，很容易导致系统扰动过程中磷被大量排放。特别是在高负荷，低温或者碳源波动过程中，污泥管理策略如果不与运行负荷进行联动调节，将加剧系统除磷的不稳定。所以剩余污泥排放制度虽然没有直接参与除磷反应过程，但是对于保持系统菌群结构和功能的运行平衡有着决定性的作用。

3 城镇污水处理厂升级改造的脱氮除磷工艺优化策略

3.1 增设可控外碳补给系统强化反硝化反应稳定性

基于反硝化系统对可利用碳源高度依赖的实际情形，对于C/N处于低水平且进水碳源浓度波动明显的污水处理厂而言，建议搭建能控制的外部碳源补给体系，保障反硝化过程连贯稳定开展，该系统由变频投加泵、储药罐，可进行 NO_3^- 、DO、ORP、COD检测的在线水质传感器、PLC控制模块和搅拌反应区组合而成。核心途径是在缺氧区前端布放好在线 NO_3^- 监测点（推荐检测范围0~50 mg/L，要求分辨率低于0.05 mg/L，把COD监控点结合进去，依靠PID闭环调控外加碳源（乙酸钠、葡萄糖、乙醇等）的投加速率，把反硝化目

标 C/N 调整到 6.5 ~ 8.0 的区间。若 NO_3^- -N 水平超出 8 mg/L、DO 水平降至 0.3 mg/L 以下、进水 COD 小于 50 mg/L，系统自行开始乙酸钠的投加，可将启动频率范围调控至 15 ~ 40 Hz，推荐采用浓度是 10% 的乙酸钠，按照进水 TN 需求算出瞬时投加量：若要去除 1 mg/L 的 NO_3^- -N，差不多需 8.6 mg/L 的 COD。若某中型污水厂日处理能力达 2 万 m^3 ，每日由外加碳源系统所消耗的乙酸钠约为 320 kg，可使总氮去除率从 68% 提升至 92% 的水平，反硝化反应速率一直稳定在 0.09 mg N/g VSS · h 水平，为规避因碳源局部超量而引起的厌氧化与丝状菌膨胀，应打造一个碳源缓冲混合区域，而且需配套液位报警与防爆装备，此系统增强了面对低碳冲击的应变水平，为深度脱氮在运行层面筑牢保障基础。

3.2 构建动态 C/N 调控平台提升脱氮工况适应性

受雨季引发的稀释效应、工业废水忽然涌入及用水周期性规律的影响，进水 C/N 频繁出现起伏波动，往往于 3 ~ 10 的区间中起伏，传统静态投加策略难以维持反硝化与除磷过程协同高效地开展，建立动态 C/N 调控平台为应对波动适应性欠佳状况的核心举措。该平台把计算模型、自动控制装置与在线多参数监测 (NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TN、COD、TOC、pH) 进行了融合，依照“目标 C/N=7”实时实施调整，平台采用的策略属于双层控制类型：第一层采用模糊逻辑式决策体系，依照水质波动走向对碳源投加预估量做调整；第二层采用以实际反馈达成的闭环控制方式，即时对投加速率加以校正。详实的技术实施环节为：在生化段进水口附近区域设立混合液采样点，以 15 分钟为间隔开展数据上传，经平台运算，牵引变频碳源投加泵和混合搅拌设备协同开展工作，维持 C/N 比动态的稳定情形，平台也能与调节池进水闸门达成联通的状态，按照负荷预测合理地开启旁路以实现调蓄。实践成效证实，某以 4 万吨 / 日为处理能力的污水厂部署该平台后，实现对 C/N 波动 ± 1 范围的管控举措，总氮去除率由 78% 提升到 93% 水平，年方差表明 TN 稳定性下滑了 47.2%，动态调控平台以其“预测—执行—反馈”模式为依托，全方位增强系统针对复杂工况的实时响应能力，堪称应对进水不稳定性无可替代调控中枢。

3.3 优化内回流系统结构实现硝化脱氮耦合效能

传统的固定回流比结构易因回流超量，造成溶解氧进入缺氧区，抑制了反硝化的进程速率，同时提升了泵的能耗水平，为加强硝化与反硝化反应的耦合作用效率，系统可引入可变频回流泵，新增低氧缓冲区，

进而优化回流路径结构，技术路径囊括三方面要点：把原回流泵进行升级，采用功率是 11 ~ 22 kW 的变频调速装置，调频的区间设定为 20 ~ 50 Hz，把 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的监测数据进行结合，实现以负荷为依据动态调整回流比；在内回流管道的末端添设低氧消解段，依靠结构性穿孔扩散器或预曝气装置把溶解氧管控在 0.2 ~ 0.4 mg/L，防止溶解氧过多干扰反硝化的进行；对回流路径设置实施优化，回流口宜设置在缺氧段前端或者厌氧段的交界处，增加硝态氮于缺氧区的反应时长。在某五段 Bardenpho 系统改造项目的实施中，采用上述优化策略后，系统于夏季以高负荷模式运行，氨氮的去除率稳定在 96% 以上水平，TN 稳定去除率提升至 91.3% 的水平，一年里回流泵电耗约减少 15.7 万度，为把控耦合效果情况，需定期将 DO 分布曲线、 NO_3^- -N 浓度梯度和回流管道内压进行联合分析，让内回流系统与生化反应区的耦合同步到位，此策略把动态控制技术与结构性设计整合在一起，实现硝化脱氮过程于空间、动力上的精准匹配衔接。

4 结束语

面对进水水质剧烈波动与排放标准持续收紧的双重挑战，升级改造城镇污水处理厂脱氮除磷工艺成为提高其整体运行效能至关重要的问题。通过准确识别碳源负荷、C/N 比例、回流配置和污泥管理的关键机理，综合外碳补给、动态调控、优化回流结构和活性群调控，能够有效地构造出反应迅速、工作平稳的高效耦合系统。未来要进一步强化运行数据的反馈机制和技术集成度等，为城镇污水处理系统朝着智能、高效和可持续的方向发展提供支持。

参考文献：

- [1] 刘遥,张东方,张文俊.A2/O 工艺处理城镇污水的脱氮除磷性能研究[J].中国新技术新产品,2022(22):125-127.
- [2] 周伟,陈轩,周娟,等.城镇污水改良 A2/O 工艺调试与脱氮除磷优化研究[J].贵州科学,2022,40(04):56-59.
- [3] 张秀玲.全流程分析在污水处理脱氮除磷工艺优化的应用[J].当代化工研究,2021(23):95-97.
- [4] 鲍任兵,高廷杨,宫玲,等.污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J].净水技术,2021,40(09):14-20.
- [5] 汪乐安.解决城镇污水处理厂生物脱氮除磷所需碳源不足及措施[J].皮革制作与环保科技,2021,02(12):125-126.