

分段进水对 A²O/MBR 组合工艺的影响机制研究

许 旻¹, 李 激², 郑晓英¹, 羊鹏程², 朱宁伟¹, 陈 卫¹

(1 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2 无锡市排水管理处, 江苏 无锡 214011)

摘要: 针对现有城市污水处理厂进水碳源不足的问题, 根据厌氧释磷和反硝化脱氮对碳源的不同需求, 采用分段进水 A²O/MBR 组合工艺, 研究分段进水对其影响机制。结果表明: 分段进水优化了进水碳源在厌氧池和缺氧池中的分布, 对 TN 的去除率随分配到缺氧池流量的增加而增大。当缺氧池分配流量增加到 0.35Q 时, 对总氮的平均去除率达到 56.8%, 较单点进水工况提高了 14.0%。分段进水对去除 COD 的影响不大, 对 COD 的去除率稳定在 82.3% ~ 85.7%。由于进水中溶解性磷浓度较低, 磷主要以胶体态和悬浮态形式存在, 通过超滤膜的截留作用, 组合工艺对 TP 的平均去除率稳定在 90% 以上; 不过采用分段进水后, 组合工艺对 TP 的平均去除率会略有下降。

关键词: 分段进水; 碳源分配; 生物脱氮除磷; A²O/MBR 组合工艺

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2011)05-0020-04

Influence Mechanism of Step-feed on Combined Process of A²O and MBR

XU Min¹, LI Ji², ZHENG Xiao-ying¹, YANG Peng-cheng², ZHU Ning-wei¹,
CHEN Wei¹

(1 College of Environmental Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2 Wuxi Drainage Management Office, Wuxi 214011, China)

Abstract Aiming at the shortage of influent carbon source in municipal wastewater treatment plants, based on the different demands of carbon source for anaerobic phosphorus release and denitrification, the combined process of A²O and MBR with step-feed was used. The influence mechanism of step-feed on the combined process was investigated. The results show that the distribution of carbon source in anaerobic and anoxic zones is optimized by step-feed process, and the removal rate of TN is improved as the flow rate distribution in anoxic zone is increased. When the flow rate distribution in anoxic zone is up to 0.35Q, the average removal rate of TN reaches 56.8%, which is increased by 14.0% compared with a single point feed into the anaerobic zone only. COD removal is hardly affected by the step-feed process, and the removal rate is between 82.3% and 85.7%. Due to the low concentration of soluble phosphorus and the existence of phosphorus mainly in colloidal and suspended forms in the influent, TP is mainly removed by the ultrafiltration membrane. The average removal rate of TP is above 90%, which is decreased slightly after the step-feed process.

Key words step-feed; carbon source distribution; biological nitrogen and phosphorus removal; combined process of A²O and MBR

基金项目: 江苏省科技支撑计划项目 (BE2008674); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2009B18014)

城市污水处理厂普遍存在进水 C/N 值较低的问题,导致无法实现同时高效脱氮除磷。目前大部分污水厂采用向生化池投加外碳源来提高对氮、磷的去除率,但是生产运行成本随之增加^[1]。在不增加外碳源的前提下,提高系统对氮、磷的去除率,成为许多污水处理厂升级改造的目标。

近年来国外开发的分段进水生物脱氮除磷新工艺^[2],在一定程度上优化了反硝化菌和聚磷菌对碳源的需求,具有脱氮效率高、操作管理简便和运行费用省等优点^[3],在不增加外碳源的条件下,为解决碳源不足问题提供了思路。我国从 20 世纪 90 年代末开始关注分段进水生物脱氮除磷新工艺的开发与应用,吴淑云等^[4]对分段进水 A/O 工艺的最高脱氮率进行了探讨,认为其脱氮率受进水流量分配比和进水水质的影响。王伟等^[5]采用流量分配系数法对进水流量进行分配,研究了流量分配比对分段进水 A/O 工艺脱氮性能的影响。祝贵兵等^[6]研究了四段式进水工艺的运行参数,分析和解释了系统发生同步硝化反硝化现象的原因,并建立了工艺的模糊控制策略。上述研究主要集中在提高系统脱氮效率、保证系统对冲击负荷的适应等方面,而有关分段进水对 A²O/MBR 组合工艺同步脱氮除磷影响的研究尚无报道。

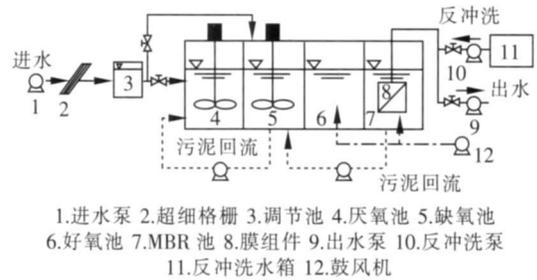
笔者以 A²O/MBR 组合工艺为研究对象,根据反硝化脱氮和厌氧释磷对碳源的不同需求量,建立分段进水分配模型,以强化组合工艺的脱氮除磷效率和提高出水水质稳定性为目标,探讨不同分段流量下,组合工艺对 TN、TP 和 COD 的去除情况,旨在为污水处理厂的升级改造和新建污水处理厂提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

中试装置采用钢板焊接而成(见图 1),尺寸为 $L \times B \times H = 5.5 \text{ m} \times 2.2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,有效容积为 24 m^3 。反应器分 A²O 池和 MBR 池,其中厌氧池、缺氧池、好氧池和 MBR 池的容积比为 3:3:4:4。在调节池出水处设置流量分配管,分别向厌氧池和缺氧池配水,并配备电磁流量计以监测流量。试验过程中温度为 20~24 °C, pH 值维持在 7.50 左右,厌氧池、缺氧池、好氧池和 MBR 池的 HRT 分别为 1.6、2.0、2.4、6.0 h, MLSS 分别为 3 665、3 771、5 133、6 045 mg/L,污泥龄为 20 d。MBR 池至缺氧池的回

流比为 $R_1 = 200\%$,缺氧池至厌氧池的回流比为 $R_2 = 100\%$,由自吸泵间歇性抽吸出水,1 个周期内的抽停时间分别为 9.3 min,采用基于 WebAccess 软件的 PLC 自控系统控制组合工艺的运行。



1. 进水泵 2. 超细格栅 3. 调节池 4. 厌氧池 5. 缺氧池
6. 好氧池 7. MBR 池 8. 膜组件 9. 出水泵 10. 反冲洗泵
11. 反冲洗水箱 12. 鼓风机

图 1 分段进水 A²O/MBR 组合工艺中试系统

Fig. 1 Schematic diagram of step-feed A²O/MBR process

1.2 试验用水

试验用水采用无锡某污水厂旋流沉砂池的出水, COD 为 154.3~370.4 mg/L, BOD₅ 为 75.32~187.35 mg/L, SS 为 96~252 mg/L, NH₄⁺-N 为 3.64~23.87 mg/L, TN 为 22.23~31.05 mg/L, TP 为 1.14~5.17 mg/L。

1.3 分析项目与方法

DO: 在线溶解氧测定仪; COD: 重铬酸钾法; NH₄⁺-N: 纳氏试剂光度法; NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO₃⁻-N: 紫外分光光度法; TN: 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; PO₄³⁻-P: 钼锑抗分光光度法; MLSS、MLVSS: 重量法; pH 值: PHS-3D 型 pH 计。

1.4 试验方法

原水分段进入厌氧池和缺氧池,以解决缺氧段因碳源不足而引起反硝化效果较差的问题。在污泥驯化培养完成后,进水流量分配按照表 1 分为三种工况,每个工况运行 15 d。

表 1 分段进水工况设计

Tab. 1 Design of step-feed conditions

项 目	厌氧池进水 Q_1	缺氧池进水 Q_2
工况 1	1Q	0
工况 2	0.85Q	0.15Q
工况 3	0.65Q	0.35Q

2 结果与讨论

2.1 分段进水对去除有机物的影响

A²O/MBR 工艺对有机物的去除主要依靠两方面的作用:一是好氧异养菌对有机物的降解、聚磷菌

吸收用于合成 PHB 和被反硝化菌用作反硝化的电子供体;二是膜对大分子有机物的截留作用,使大分子有机物获得比传统活性污泥法更多的与微生物接触反应时间,提高对有机物的去除率。测定显示,分段进水前后,尽管进水 COD 在 154.3~370.4 mg/L 之间波动,但出水 COD 一直稳定在 50 mg/L 以下,达到了 GB 18918—2002 中的一级 A 排放标准,对 COD 的去除率为 82.3%~85.7%,没有太大变化。原因可能是膜的高效截留作用,使反应器内保持了较高的污泥浓度和微生物量,强化了系统的生物降解作用。综上所述,分段进水对 COD 的去除几乎没有影响。

2.2 分段进水对脱氮功效的影响

2.2.1 对去除总氮和氨氮的影响

由于分段进水仅仅是改变了有机碳源在厌氧池和缺氧池中的分布,并没有影响到后续的好氧硝化过程,因此系统的硝化效果不受分段进水的影响。在三种不同流量分配方式下,系统对氨氮的去除率均维持在 99% 左右。分析系统高效去除氨氮的原因,可能是由于较长的泥龄,加上膜的高效截留作用,使系统中保持了大量的硝化菌,从而保证了良好的硝化效果。

当未采用分段进水时(工况 1),对总氮的平均去除率为 42.8%,平均出水总氮为 14.75 mg/L(见图 2),存在超标排放风险。通过分析,发现进水 TN 中氨氮约占 90%,而出水 TN 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占 90% 以上,说明硝化过程完全,而反硝化进行得不彻底,这也是系统脱氮效率难以提高的原因。分段进水优化了进入缺氧池的有机碳源,有助于反硝化过程的进行。随着分配到缺氧池流量的增加,对 TN 的去除率提高。当进入缺氧池的流量达到 0.35Q 时,对 TN 的平均去除率达到 56.8%,较单点进水工况的提高了 14.0%。

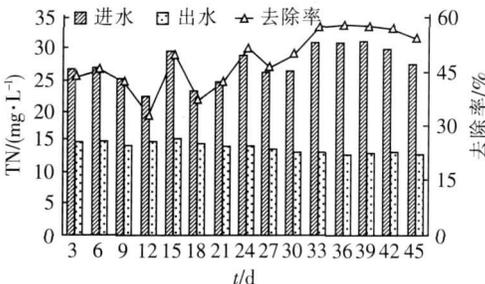


图 2 分段进水对总氮去除效果的影响

Fig 2 Effect of step-feed on TN removal

2.2.2 硝化和反硝化规律

不同工况条件下,氨氮和硝酸盐氮浓度的沿程变化分别如图 3 和图 4 所示。

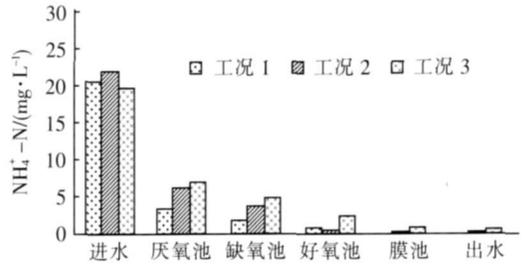


图 3 氨氮浓度沿程变化规律

Fig 3 Ammonia nitrogen removal by each stage under different step-feed conditions

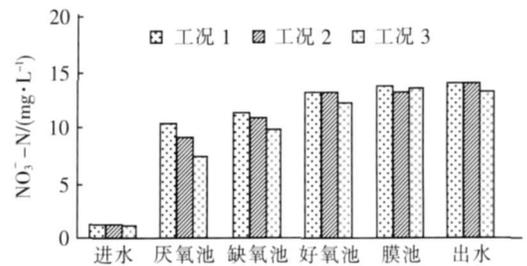


图 4 硝酸盐氮浓度沿程变化规律

Fig 4 Nitrate nitrogen removal by each stage under different step-feed conditions

由图 3 可知,大部分氨氮在好氧池中被去除,经过膜池后氨氮浓度进一步降低,出水氨氮浓度均在 0.5 mg/L 以下,硝化反应进行得很彻底,分段进水对氨氮的去除效果几乎没有影响,这可能是由于进水碳源不足,分段进水虽然优化了碳源在厌氧池和缺氧池中的分布,但经过厌氧释磷和缺氧反硝化后,进入好氧段的 COD 不多,使得硝化菌在与异养菌的竞争中成为优势菌种;此外,与普通活性污泥法相比,膜的截留作用使得系统的 MLSS 值较大,一般维持在 6000 mg/L 左右,反应器内富集了大量的硝化菌,进入反应器内的氨氮可立即被转化为硝态氮,所以对氨氮的去除效果不受分段进水的影响,并维持在较高水平。

由图 4 可知,采用分段进水后,缺氧池的硝酸盐氮浓度降低,反硝化作用增强,系统脱氮效果得到改善。在生物反硝化过程中,硝酸盐氮和有机物被同时去除,两者的比例即碳氮比是影响生物脱氮效率的关键因素之一。有研究认为,当 C/N 值 > 4~6 时,碳源才充足,而实际的 C/N 值需求可能高达 8^[7]。试验测定了沿程的 COD 浓度,结果显示, COD

的最大表观去除率在厌氧段, 进入缺氧池的 COD 仅剩 60 mg/L 左右。因此, 系统中反硝化不彻底的主要原因是碳源不足。根据物料平衡计算得到不同工况下缺氧池进水的 C/N 值分别为 4.26、5.58、8.29, 可知随着缺氧池进水 C/N 值的增加, 系统对 TN 的去除率提高。

2.3 分段进水对除磷效果的影响

分段进水后, 对总磷的去除效果略有下降。在工况 1 下, 出水总磷为 0.14~0.31 mg/L, 平均去除率为 93.2%; 分段进水后, 出水总磷为 0.18~0.28 mg/L, 在工况 2、3 下对总磷的平均去除率分别为 91.9% 和 87.7%。

在本研究中, 组合工艺系统设置了好氧区至缺氧区和缺氧区至厌氧区的双回流系统, 意在缓解传统 A²O 工艺中因回流污泥携带大量的硝酸盐而对聚磷菌释磷产生抑制的问题。但是在实际运行中, 由于进水碳源不足, 经过厌氧段的消耗, 进入缺氧池供反硝化菌利用的碳源很少, 缺氧段的反硝化效果不理想, 导致大量的硝酸盐未被反硝化而进入厌氧池, 引起反硝化菌和聚磷菌对碳源的争夺, 比聚磷菌更具碳源亲和力的反硝化菌优先消耗易生物降解有机物进行反硝化。理论上, 当进水持续分配到缺氧池后碳源得到补充, 反硝化效果增强, 由图 4 可知缺氧段硝酸盐浓度的降低使得流入厌氧区的硝酸盐减少, 可在一定程度上缓解反硝化菌和聚磷菌对有机物的竞争。王佳伟等^[8]的研究显示, 分段进水 A²O 工艺对 TP 的去除率较厌氧段单点进水时有明显提高。但本研究中分段进水对系统除磷的影响不大, 对 TP 的去除率一直维持在较高水平, 出水 TP 浓度能够满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 A 标准。在对进水水质进行检测时发现, 溶解性磷含量很少, 溶解性正磷酸盐平均浓度只有 0.43 mg/L, 仅占进水 TP 的 7.1%~16.65%, 水中的磷主要以胶体态和悬浮态形式存在, 抑制了聚磷菌的生物活性。考察沿程的正磷酸盐含量, 分段进水前后厌氧段和好氧段的 PO₄³⁻-P 浓度没有明显变化, 系统的厌氧释磷和好氧吸磷作用均很微弱。在这种情况下系统除磷效果依然较好的原因, 是进水中的磷主要以颗粒态的形式存在, 这些颗粒态的磷容易被超滤膜截留, 所以系统仍能保持良好的去除总磷效果。分段进水后, 进入到厌氧池的碳源减少, 使除磷效果略有下降。

3 结论

① A²O MBR 组合工艺强化了生物降解作用, 对 COD 的去除率稳定在 82.3%~85.7%, 几乎不受分段进水的影响。

② 分段进水优化了碳源在厌氧池和缺氧池中的分布, 提高了系统整体的脱氮效果。当进入缺氧池的流量为 0.35Q 时, 对总氮的平均去除率达到 56.8%, 较单点进水工况的提高了 14.0%。

③ 进水中溶解性磷浓度较低, 磷主要以胶体态和悬浮态形式存在, 通过超滤膜的截留作用, 对 TP 的平均去除率稳定在 90% 左右; 但采用分段进水后对 TP 的平均去除率略有下降。

参考文献:

- [1] Wang Xiaoliang, Peng Yongzhen, Wang Shuying, et al. Influence of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A²/O process[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 2006, 28(6): 397-404.
- [2] Larrea L, Larrea A, Ayeasa E, et al. Development and verification of design and operation criteria for step feed process with nitrogen removal[J]. *Water Sci Technol* 2001, 43(1): 261-268.
- [3] 邱慎初, 丁堂堂. 分段进水的生物脱氮除磷工艺[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(4): 32-36.
- [4] 吴淑云, 祝贵兵, 彭永臻. 分段进水生物脱氮工艺最高脱氮率的探讨[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(4): 594-598.
- [5] 王伟, 王淑莹, 孙亚男, 等. 流量分配对分段进水 A/O 工艺脱氮性能的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 96-101.
- [6] Zhu Guobing, Peng Yongzhen, Wu Shuyun, et al. Simultaneous nitrification and denitrification in step-feed biological nitrogen removal process[J]. *Chem Eng J* 2007, 19(9): 1043-1048.
- [7] 郭海娟, 马放, 沈耀良. C/N 比对反硝化除磷效果的影响[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(3): 367-371.
- [8] 王佳伟, 郑江, 周军, 等. 基于碳源需求的 A²/O 工艺分段进水研究[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(11): 47-50.

作者简介: 许旻 (1987-), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为水处理技术。

E-mail: xumins930@163.com

收稿日期: 2010-11-01