

城市可持续污水生物处理技术

王晓莲¹, 彭永臻¹, 王淑莹¹, 马勇²

(1. 北京工业大学, 北京市水环境恢复重点实验室, 北京 100022;
2. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 针对传统污水生物脱氮除磷处理技术存在的问题, 提出了可持续污水处理的概念, 介绍了国内外生物脱氮除磷领域开发的若干新工艺, 为水处理工艺选择提供了新思路、新方法, 在此基础上提出了城市可持续污水生物处理工艺。

关键词: 污水生物处理; 可持续; 生物脱氮除磷; 反硝化除磷(DPB)

中图分类号: TQ 085⁺. 413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3770(2004)02-0106-04

1 可持续污水处理概念

针对传统污水生物脱氮除磷处理技术存在的问题, 我们提出了可持续污水生物处理技术的概念, 以尽可能的减少能耗、高效节能和污水可回用为目的的新技术, 推动污水处理技术不断前进。本概念主要包含以下几个内容: 尽可能减少 COD 氧化; 尽可能大的甲烷(CH₄)产量; 尽可能低的能量消耗, 相应尽可能减少 CO₂ 释放; 尽可能减小剩余污泥产量; 磷酸盐再生; 处理水回用。

2 可持续污水生物脱氮技术

2.1 短程硝化/反硝化

长期以来, 无论是在污水生物脱氮理论上还是在工程实践中, 都认为要实现污水生物脱氮就必须使 NH₄⁺ 经历典型的硝化和反硝化过程才能完全被去除, 这条途径称为全程(或完全)硝化反硝化生物脱氮。最近研究表明, 生物脱氮过程中出现了一些超出传统认识的新现象, 如亚硝酸型硝化, 硝化不仅可以由自养菌完成, 而且异氧菌也可以完成好氧硝化, 某些微生物在好氧条件下也可以进行反硝化作用。有些研究者在实验中发现厌氧条件下氨氮减少的情况。这些现象的发现为水处理工作者设计处理工艺提供了新的理论和思路, 具有较高的应用价值。

从氨氮的微生物转化过程来看, 氨氮被氧化成硝酸氮是由两类独立的细菌催化完成的两个不同反应, 应该可以分开。对于反硝化菌无论是硝酸氮还是亚硝酸氮均可以作为最终受氢体, 因而整个生物脱氮过程也可以经 NH₄⁺ → NO₂⁻ → N₂ 这样的途径完成。早在 1975 年 Voet 等就发现在硝化过程中亚硝酸氮积累的现象并首次提出了亚硝酸型生物脱氮(也可称为不完全或称短程硝化/反硝化生物脱氮)。这种将硝化过程控制在亚硝酸阶段的短程生物脱氮工艺具有以下特点: 对于活性污泥法, 可节省氧供应量约 25%, 降低能耗; 节省反硝化所需碳源 40%, 在 C/N 比一定的情况下提高 TN 去除率; 减少污泥生成量可达 50%; 减少投碱量; 缩短反应时间, 相应反应器容积减少, 节省基建费用。针对这些新发现开发出多种生物脱氮新工艺。

SHARON (Single reactor for High activity Ammonia Removal Over nitrite) 工艺是由荷兰 Delft 技术大学开发的脱氮新工艺^[1]。其基本原理是将氨氮氧化控制在亚硝化阶段, 然后进行反硝化。用 SHARON 工艺来处理城市污水二级处理系统中污泥消化上清液和垃圾滤出液等高氨氮废水, 可使硝化系统中亚硝酸积累达 100%。该工艺核心是应用硝酸菌和亚硝酸菌的不同生长速率, 即在高温(30~35)下, 亚硝酸菌的生长速率明显高于硝酸菌的生

收稿日期: 2002-06-04

基金项目: "863"资助项目(2003AA 601010); 国家"十五"科技攻关项目(2002BA 860B 04);
北京市教委科技发展计划重点项目(KZ200310005003)

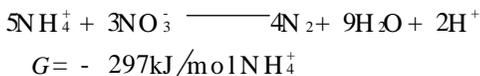


长速率, 亚硝酸菌的最小停留时间小于硝酸菌这一固有特性, 通过控制系统的水力停留时间使其介于硝酸菌和亚硝酸菌最小停留时间之间, 从而使亚硝酸菌具有较高的浓度而硝酸菌被自然淘汰, 维持稳定的亚硝酸积累。在 SHARON 工艺中, 通过提高反应器中的温度, 使在较高温度下, 增长速率较快的亚硝化细菌占优势, 所以温度和 HRT 值应严格控制。利用此专利工艺的两座废水生物脱氮处理厂已在荷兰建成。

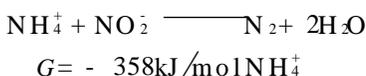
OLAND (*Oxygen Limited Autotrophic Nitrification Denitrification* 氧限制自养硝化反硝化) 工艺是由比利时 Gent 微生物生态实验室开发。该工艺技术关键是控制溶解氧浓度, 使硝化过程仅进行到 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 阶段。由于该过程缺乏电子受体, 使得 NH_4^+ 氧化产生的 NO_2^- 直接氧化未反应的 NH_4^+ 而形成 N_2 。溶解氧浓度是硝化与反硝化过程中的重要因素, 研究表明, 低溶解氧下亚硝酸菌增殖速率加快, 补偿了由于低氧所造成的代谢活动下降, 使得整个硝化阶段中氨氮氧化未受到明显影响, 而亚硝酸氧化受到明显的抑制。研究表明低氧下亚硝酸大量积累是由于亚硝酸菌对溶解氧的亲合力较硝酸菌强。亚硝酸菌氧饱和和常数一般为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg/L}$, 硝酸菌的为 $1.2 \sim 1.5 \text{ mg/L}$ 。OLAND 工艺就是利用这两类菌动力学特性的差异, 实现了淘汰硝酸菌, 使亚硝酸氮大量积累。

2.2 厌氧氨氧化 (ANAMMOX)

1990 年, 荷兰 Delft 技术大学 Kluyver 生物技术实验室开发出 ANAMMOX 工艺 (*Anaerobic Ammonium Oxidation*)^[21], 即在厌氧条件下, 以 NO_3^- 作为电子受体将氨氮转化为氮气, 研究发现 NO_2^- 是一个关键的电子受体。由于该菌是自养菌, 不需要添加有机物来维持反硝化。发生的反应可以假定为:



最近研究表明, NO_2^- 也可以作为电子受体进行如下反应:



根据化学热力学原理, 上述反应的 $G < 0$, 说明反应可以自发进行, 厌氧氨氮化过程的总反应是一个产生能量的反应。从理论上讲, 可以提供能量供微生物生长。因此, 可以假定厌氧反应器中存在微生物, 它可以利用氨作为电子供体还原硝酸盐, 或者说

它可以利用硝酸盐作为电子受体来氧化氨。

ANAMMOX 工艺基本原理为氨的氧化与 NO_2^- 的还原相偶联, 从理论上讲并不新颖。本工艺的新颖之处在于利用生化原理开发出切实可行的生物脱氮的新工艺。

2.3 SHARON 和 ANAMMOX 联合工艺

SHARON 工艺可以通过控制温度、水力停留时间、pH 等条件, 使氨氮氧化控制在亚硝化阶段, 目前尽管 SHARON 工艺以好氧/厌氧的间歇运行方式处理高氨废水取得较好的效果, 但由于在反硝化中需要消耗有机碳源, 并且出水浓度相对较高, 因此可以 SHARON 工艺作为硝化反应器, 而 ANAMMOX 工艺作为反硝化反应器进行组合工艺。SHARON 工艺可以控制部分硝化, 使出水中的 NH_4^+ 与 NO_2^- 比例为 1:1, 从而作为 ANAMMOX 工艺的进水, 组成一个新型的生物脱氮工艺。联合的 SHARON-ANAMMOX 工艺具有耗氧少、污泥产量少、不需外加碳源等优点, 具有很好的应用前景。

2.4 CANON 工艺

CANON (*Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite*) 工艺是将好氧亚硝化和厌氧氨氧化相结合的一种新型脱氮工艺。其原理是好氧氨氧化菌及厌氧氨氧化菌具有共生关系。

2.5 同时硝化反硝化

传统观点认为硝化与反硝化反应不能同时发生, 而近年来的新发现突破了这一认识, 使得同时硝化反硝化成为可能。近年来好氧反硝化菌和异养菌的发现以及好氧反硝化、异养反硝化等研究的进展, 奠定了 SND 生物脱氮的理论基础。当好氧环境与缺氧环境在一个反应器中同时存在, 硝化和反硝化在同一个反应器中同时进行称为同时硝化反硝化 (SND-*Simultaneous Nitrification and Denitrification*)。同时硝化反硝化不仅可以发生在生物膜反应器中, 如流化床、曝气生物滤池、生物转盘; 也可以发生在活性污泥系统中, 如曝气池、氧化沟。与传统生物脱氮工艺相比, SND 工艺具有明显的优越性, 主要表现在: 硝化过程中碱度被消耗, 而同步反硝化过程中产生了碱度, SND 能有效地保持反应器中 pH 稳定, 而且无需外添加碱, 节省运行费用。SND 意味着在同一反应器, 相同的操作条件下, 硝化反硝化能同时进行。如果能保证好氧反应器中一定效率的硝化反硝化反应同时进行, 那么对于连续运行的 SND 工艺污水处理厂, 可以省去缺氧池的费用, 或至少减

少其容积。对于仅由一个反应池组成的 SBR 反应器而言, SND 能够降低实现完全硝化反硝化所需的总时间。

3 可持续废水生物除磷新技术

3.1 反硝化除磷原理

传统生物除磷是指聚磷菌 (PAOs) 在好氧条件下吸磷, 在厌氧条件下放磷。而传统脱氮除磷系统中, 缺氧反硝化细菌和聚磷菌竞争有机物, 聚磷菌必须在反硝化结束后, 系统进入完全厌氧状态时才能进行放磷, 这样就必须增加碳源的投加量, 如果处理高浓度氮氨废水, 耗费碳源的数量就更大。最近研究发现存在反硝化除磷细菌 (DPB - *Denitrifying Phosphorus Removing Bacteria*) 能在缺氧 (无 O_2 存在 NO_3^-) 环境下摄磷。DPB 被证实具有同 PAO 极为相似的除磷原理, 只是它们氧化细胞内贮存的 PHA 时电子受体不同而已 (PAO 为 O_2 , 而 DPB 为 NO_3^-)。这使得摄磷和反硝化 (脱氮) 这两个不同的生物过程借助同一个细菌在同一个环境中完成。其结果, 摄磷和脱氮过程的结合不仅节省了脱氮对碳源的需要; 而且摄磷在缺氧内完成可缩小曝气区的体积 (亦节省能源); 产生的剩余污泥量也有望降低。

3.2 反硝化除磷新工艺

3.2.1 DEPHANOX 工艺

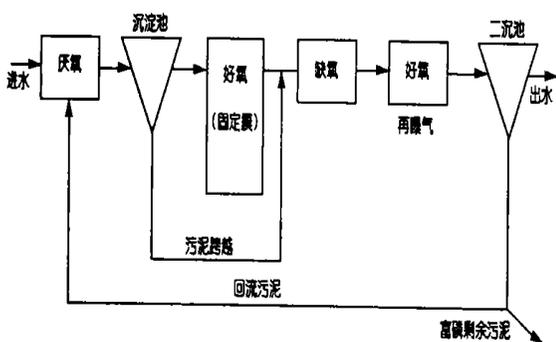


图 1 DEPHANOX 工艺流程图

典型的反硝化除磷工艺为 DEPHANOX^[3], 工艺流程图如图 1 所示。回流污泥完成在厌氧池中的放磷和 PHA 储备后在中间沉淀池中泥水分离; 分离后的上清液直接进入随后的好氧固定膜反应池进行硝化; 沉淀的污泥则跨越固定膜反应池进入缺氧反应池内同时完成反硝化和摄磷 (关键步骤); 脱氮和摄磷后的混合液再进入曝气池再生 (氧化细胞内残余的 PHA), 使其在下一循环中发挥最大放磷和

PHA 储备能力。该工艺不仅可以达到稳定的磷和氮的去除, 而且还可以减少 50% 的 COD 需求量和减少 30% 的需氧量以及减少 50% 的产泥量; 不仅如此, 还避免了反硝化细菌和聚磷菌对有机物的竞争, 也避免了两种细菌泥龄的差异; 该工艺还可以抑制污泥膨胀的发生。系统适合 COD/N 较低的情形。当进水 COD/N 较高时, 由于缺乏足够的 NO_3^- , 磷的去除不充足。这种情况下, 在缺氧池后增加的好氧池, 可使剩余的磷通过 DPB 利用 O_2 作为电子受体来去除。

3.2.2 BCFS 工艺

BCFS (*Biologische - Chemische - Fosfaat - Stikstof verwijdering*) 工艺是由荷兰 DELFT 科技大学在改进本国污水处理厂脱氮除磷效果基础上发展起来的新工艺^[4], 它充分利用 DPB 的缺氧反硝化除磷作用以实现磷的完全去除和氮的最佳去除, 对于城市污水在处理过程中无需添加化学药剂。BCFS 工艺将不同功能的细菌用空间分隔开来, 并通过不同的循环系统来控制其生长环境。BCFS 工艺由 5 个功能相对专一的独立反应器 (厌氧池、选择池、缺氧池、缺氧/好氧池、好氧池) 及 3 个循环系统构成 (如图 2 所示)。

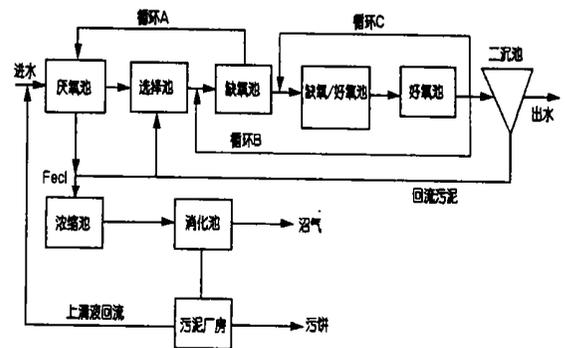


图 2 BCFS 工艺流程图

BCFS 工艺的主要特点: 对氮、磷的去除率高, 可使出水中总氮 $< 5 \text{ mg/L}$, 正磷酸盐含量几乎为零。SVI 值低 (80~120 mL/g) 且稳定从而可有效地减少曝气池及二沉池的容积。控制简单, 通过氧化还原电位与溶解氧可有效地实现过程稳定, 尤其利于对负荷的控制。与常规污水厂相比, 其污泥产量减少了 10%, 从而进一步减少了污泥的处理费用。利用 DPB 实现生物除磷, 使碳源 (COD) 能被有效地利用, 从而使该工艺在 COD/(N+P) 值相对低的情况下仍能保持良好的运行状态, 同时使除磷所需的化

学药剂量大大减少。使用生物除磷器获得富含磷的污泥, 使磷的循环利用成为可能。

4 可持续城市污水处理推荐工艺

以上污水脱氮除磷的新工艺在很大程度上可以解决目前传统生物处理技术存在的问题, 为实现可持续污水处理, 可以将亚硝酸型生物脱氮、反硝化除磷等新工艺进行优化组合作为推荐工艺应用到城市污水处理中, 做到最大限度的高效、经济、节能。

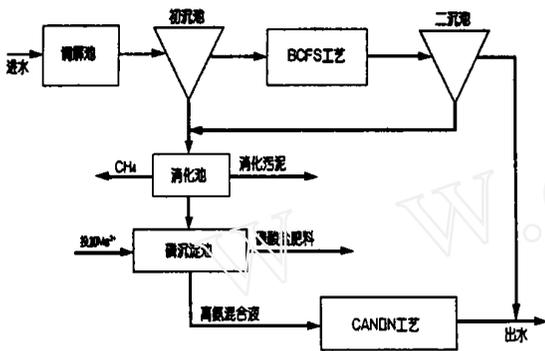


图3 可持续污水生物处理推荐工艺

如图3所示为城市污水处理推荐工艺流程。城市污水首先进入吸附调节池中, 在此进行水质均化稳定后进入初沉池; 沉淀后上清液进行BCFS工艺单元中完成反硝化和摄磷(关键步骤); 然后在二沉池中进行泥水分离, 沉淀污泥和中间沉淀池产生的污泥排入消化池; 在此进行厌氧消化, 收集消化产生的CH₄以作为能量使用, 同时放磷, 消化的污泥排入磷沉淀池, 在其中投加Mg²⁺盐进行化学除磷, 沉淀的高磷污泥可作为农用肥料; 随后消化产生的高温高氨混合液进入CANON工艺处理单元进行脱

氮反应, 最后处理清水同二沉池出水一起外排作为城市回用水。该推荐工艺充分体现了可持续污水处理概念, 能最大程度的减少COD氧化; 生成大量的甲烷(CH₄), 相应尽可能减少CO₂释放; 能减小剩余污泥产量; 磷酸盐污泥可充分利用; 处理水也可回用。

5 结语

可持续污水处理概念的提出为日后污水处理厂的设计提供了新的思路, 并且也为传统污水二级处理的改进提供新的解决措施。但以上所介绍的可持续污水处理新技术主要以工程试验研究成果为依据, 对于该技术的研究还需进一步深入。

参考文献

- [1] Jetten M S M, et al. Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system [J]. Wat Sci Tech, 1997, 35(9): 171- 180
- [2] Straous M, et al. Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) process in different configurations[J]. Wat Res, 1997, 31: 1955- 1962
- [3] Bortone G, et al. Biological anoxic phosphorus removal - the Dephanox process[J]. Wat Sci Tech, 1996, 34(1 - 2): 119- 128
- [4] M C M Van Loosdrecht, et al. Upgrading of wastewater Treatment processes for integrated nutrient removal- the BCFS process[J]. Wat Sci Tech, 1998, 37(9): 209- 211

URBAN SUSTAINABLE WASTEWATER BIOLOGICAL TREATMENT TECHNOLOGY

WANG Xiao-lian¹, PENG Yong-zhen¹, WANG Shu-ying¹, MA Yong²,

(1. Beijing Municipal Key Lab of Environment Recovery, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2 Faculty of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract Aiming at the biological nitrogen and phosphorus removal technology for conventional wastewater, we introduce the conception about the sustainable treatment technology, which deals with many new technologies about biological nitrogen and phosphorus removal in this paper, and provides new idea and method for water treatment. On the basis of the above, the urban wastewater sustainable treatment technology is also introduced.

Key words wastewater biological treatment; sustainable; biological nitrogen and phosphorus removal; Denitrifying Phosphorus Removing Bacteria (DPB)