

废水处理同时硝化/反硝化脱氮技术现状与展望

龚云华 高廷耀

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:阐述了废水生物处理同时硝化/反硝化脱氮技术现状及发展,对几种具有同时硝化/反硝化效应的生物反应器与工艺进行了概述和讨论,提出了今后可能的研究方向。

关键词:污水;硝化;反硝化;现状

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8759(2001)05-0017-05

THE PRESENT SITUATION AND EXPECTATION OF TECHNOLOGIES FOR BIOLOGICAL NITROGEN REMOVAL FROM WASTEWATER BY SIMULTANEOUS NITRIFICATION AND DENITRIFICATION(SND)

GONG Yun-hua GAO Ting-yao

(*Environment School of Tongji University, Shanghai 200092*)

Abstract: The present situation of technologies for biological nitrogen removal from wastewater by simultaneous nitrification and denitrification(SND) was summarized briefly. Several types of reactors and processes which have efficiency of SND were discussed, and the future research direction was expected.

Keywords: wastewater, nitrification, denitrification, present situation

废水生物处理脱氮过程主要包括两个阶段:第一阶段为氨氮转变为亚硝酸根/硝酸根的硝化反应;第二阶段为亚硝酸根/硝酸根转变为氮气的反硝化反应。传统的脱氮理论认为,硝化反应在好氧条件下通过自养型硝化细菌作用发生,而反硝化则在缺氧条件下通过兼性反硝化菌作用实现^[1,2,3]。为了提供两种反应所需的不同环境,需将反应区分隔开或通过间歇式反应系统实现批式运行。然而,最近的许多研究表明,在同一反应器中能够实现上述两种反应,尤其是好氧条件下,可以发生反硝化反应,这个现象被称为同时硝化/反硝化

(SND)现象^[2,4,5]。相对于传统的分隔工艺来讲,(SND)具有较为明显的优越性,而引起了污水处理厂的设计师和运行管理人员等的广泛兴趣。在连续运行的污水处理厂中,SND能保证在同一曝气池中发生程度适当的硝化/反硝化作用,实现一定的脱氮效率。对整个脱氮工艺而言,可以节省缺氧池或至少减少它的容积。通常条件下,通过SND反应器脱氮,亦不需要复杂的好氧/缺氧区组合控制和相关的测控装置^[2]。本文就当前的废水生物处理脱氮工艺中的同时硝化/反硝化研究进展进行了系统概述。

1 同时硝化/反硝化脱氮技术机理研究

同时硝化/反硝化脱氮现象的机理可以从微

收稿日期 2001-02-26

第一作者简介:龚云华,男,1976年生,毕业于湖南大学,现为同济大学环境科学与工程学院硕士研究生,研究方向为水污染防治,导师为高廷耀教授。

生物学及生物化学角度和物理学角度加以解释。

1.1 微生物及生物化学解释

生物脱氮的一个关键环节是反硝化过程,在反硝化过程中,亚硝酸根/硝酸根在呼吸链中作为电子受体,被微生物分解为 N_2 及 NO 、 N_2O 等中间产物。最初,反硝化被认为只有在严格的缺氧条件(状态)下才能发生,氧气的存在对反硝化过程有抑制作用,主要表现在电子受体 (O_2 、 NO_2^- 和 NO_3^-) 之间的争夺电子能力差异上,但氧对大部分反硝化细菌本身并没有抑制作用,由于反硝化菌是兼性好氧菌,还可以利用溶氧 (DO) 完成呼吸过程中的某些环节^[6]。从微生物学及生物化学角度出发,特殊微生物种群的存在被认为是发生同时硝化/反硝化的主要原因,近年来的研究中,有许多新的脱氮系列菌族被鉴定或分离出来,包括起反硝化作用的自养硝化菌 (Anammox 工艺)^[7] 及起反硝化作用的异养菌 (好氧反硝化)。

Robertson 等 (1998) 证明好氧反硝化菌也是异养硝化菌,可将氨氮直接转化为气体,如 *Thiophaea Pontatroph* 等。其它好氧反硝化菌可利用亚硝酸根/硝酸根呼吸 (好氧反硝化),在最后阶段,氨氮氧化 (异养硝化) 与 PHB 的形成能消耗过量的还原能量;同时指出好氧反硝化与异养硝化速率随溶解氧 (DO) 浓度升高而降低^[6,8]。而 Kngelmal 等 (1991) 则在好氧/厌氧序批式活性污泥系统中观察到硝酸盐对呼吸过程中氧的利用有抑制作用 (NO_3^- 在 1.0 mg/L 时仍有此作用),正是由于其抑制作用,菌胶团可以利用 NO_x 作为电子受体而发生反硝化作用,即使是溶解氧 (DO) 浓度很高的情况下也如此^[6]。一种名为 *Microvigula aerodenitrification* 的新的格兰氏阴性菌在实验室规模的上流式厌氧-好氧滤池中被分离出来,研究证明这类细菌能够稳定地维持促进反硝化反应的能力。研究者从酶的水平上研究了好的反硝化作用的分子学基础;认为是由一种胞外硝酸盐还原酶引起了好氧反硝化作用,较之缺氧反硝化细菌而言,好氧反硝化菌有较慢的反硝化速率和嗜好某些特定有机物质 (如甲醇) 等特点^[7,9,10]。

目前,对生物化学及脱氮工艺的微生物学研究 and 解释还不够完善,从微生物学角度和生物化学角度对同时硝化/反硝化现象的认识仍在发展

与探索之中。

1.2 物理学解释

对同时硝化/反硝化的物理学解释主要包括硝化/反硝化的微环境理论和反应器内的好氧/缺氧大环境假设,物理学角度的解释是同时硝化/反硝化现象目前被普遍接受的观点^[11]。

微环境理论认为,在活性污泥絮体中,由于氧的扩散 (传递) 所限制存在溶解氧 (DO) 梯度。絮体外表面与气、液相直接接触而溶解氧较高,微生物群体以好氧菌、硝化菌为主,絮体内层由于氧传递受阻以及外部氧被大量消耗而形成了缺氧微环境,反硝化菌占优势。缺氧微环境的形成受水中溶解氧 (DO) 浓度的高低及微生物絮体结构、尺寸大小影响^[4,6,11]。

生物反应器混合因池型、进水及供氧方式不同而呈现多种形态,在不同的混合形态条件下,如由于曝气装置不同引起的不完全混合形态下,在生物反应器内能形成缺氧/厌氧区段。这种情况有别于缺氧微环境,被称为生物反应器的大环境。在同一生物反应器缺氧/厌氧大环境条件下可以发生反硝化反应,联合一定区段内的好氧环境中有机物去除和氨氮的硝化,实现同时硝化/反硝化脱氮^[1,12]。

1.3 影响同时硝化/反硝化的因素

研究表明^[4,11],影响生物同时硝化/反硝化效果的主要因素有:碳源、溶解氧 (DO) 浓度、微生物絮体结构、尺寸。

1.3.1 碳源

反硝化过程需要利用碳源作为能源和合成细胞成分的物质,因此足够的碳源是保证有效的反硝化反应所需的必要条件。Barnard (1992) 发现在大多数城市污水处理中, $TCOD : TK_n$ 为 7 时,可以实现完全的反硝化反应;Goronsy (1992) 认为通常情况下,如果要实现同时脱氮除磷,则 $TCOD : TKN$ 至少要达到 9 以上。Klangduen Pochana (1999) 发现易生物降解 COD 比例的增加能提高同时硝化/反硝化效果,表明溶解性 COD 对同时硝化/反硝化有很强的影响作用^[4]。国内学者认为影响好氧同时硝化/反硝化碳源的因素包括曝气量和污泥有机负荷,在控制曝气量的前提下,污泥有机负荷将直接影响同时硝化/反硝化的效果。生产性试

验中污泥有机负荷控制在 $0.10 \sim 0.15 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 范围内,可保证反硝化顺利进行^[11]。

1.3.2 溶解氧(DO)浓度

适当控制反应器中溶解氧(DO)浓度是提高同时硝化/反硝化效果的重要方式。反硝化反应在溶解氧(DO)浓度为零时可取得最佳效果,当溶解氧(DO)浓度高于 0.2 mg/L ,反硝化效果显著降低,而硝化反应则要求溶解氧(DO)浓度在 2.0 mg/L 以上;低于 $0.2 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 时,硝化反应几乎不能发生。Munch(1996)发现当溶解氧(DO)浓度在 0.5 mg/L 时,反硝化速率基本与硝化速率相等,从而可获得有效的同时硝化/反硝化效果^[3,4,13]。

1.3.3 微生物絮体特性

微生物絮体结构、尺寸影响同时硝化/反硝化效果主要是基于从物理学角度出发对同时硝化/反硝化的解释。絮体表面更新速率快慢、反应器的负荷等都是影响絮体结构、尺寸的重要因素,其直接影响到缺氧微环境的形成。进水中悬浮物的浓度、颗粒的大小及比表面积影响絮体的吸附能力和密度,对缺氧微环境的比例造成影响,从而影响同时硝化/反硝化脱氮效果,在生物反应器不同混合形态条件下,微生物絮体结构、尺寸及群体特性受曝气方式和强度、进水方式等影响,出现大环境条件下不同的同时硝化/反硝化效应^[1,4,6,12]。

2 同时硝化/反硝化反应器与工艺研究

目前,生物脱氮已成为污水控制领域研究的热点问题,国内外研究者对同时硝化/反硝化脱氮技术反应器和工艺的研究主要有 SBR 法、氧化沟工艺、A/O 和 A/A/O 工艺、生产规模的连续流工艺以及生物流化床、复合反应器等。

SBR 工艺及间歇反应器可以通过工艺运行控制实现好氧/厌氧的过程交替,从而在同一反应器中相似操作条件下实现同时硝化/反硝化脱氮功能^[2,6,14]。Hyungseok Yoo 等(1999)^[15]运用间歇反应器同步硝化/反硝化作用去除合成剂废水中的氮取得了良好的效果,就推荐工艺的重要参数进行了探讨,得出了有效同时硝化/反硝化作用的溶解氧最适浓度 $0.4 \sim 2.5 \text{ mg/L}$,曝气阶段结束时最适溶解氧宜控制在 $2.0 \sim 2.5 \text{ mg/L}$,发现溶解氧低于 1.0 mg/L 时,有反硝化作用发生,间歇运行控制曝

气周期长短时可利用反硝化菌与硝化菌世代时间的差异来调整缺氧/好氧和好氧的交替;并指出中性的 pH 值范围(7~8)有利于同时硝化/反硝化作用。Klangduen Pochana 等(1999)^[4]应用 SBR 反应器工艺处理屠宰废水时,通过同时硝化/反硝化作用取得了 95% 的总氮去除率,发现碳源和溶解氧是两个关键的参数,外加乙酸作碳源时,可明显增加同时硝化/反硝化效果。结论认为溶解性有机物(COD)、溶解氧、活性污泥絮体尺寸是影响同时硝化/反硝化的主要因素,较大的絮体尺寸有利于同时硝化/反硝化,增加反应器中溶解氧浓度对同时硝化/反硝化有负面影响,但在溶解氧升至 0.8 mg/L 前,这种效应并不明显。基于物理学假设的前提,Klangduen Pochana 等还对同时硝化/反硝化产生的机理作了研究,在实验基础上推导并验证了解释同时硝化/反硝化现象的动力学模型^[16]。祝经纶研究了低氧曝气 SBR 工艺中脱氮效果。实现了同时硝化/反硝化效果,李锋等在实验基础上对有氧条件下同时硝化/反硝化进行了动力学模型的推导,很好地模拟了 SBR 法和推流式反应器中同时硝化/反硝化的效果^[3,16];刘德君通过对生产规模的连续流工艺改进、投加脱氮菌种的方法在同一反应器中实现了同时硝化/反硝化脱氮。结果表明^[17],脱氮不用加碱,但需克服有氧条件下反硝化作用差,需不断补充反硝化菌源。G. T. Daigger 对生产性运行的 Orbal 氧化沟工艺中的同时硝化/反硝化现象进行了研究,并探讨了其机理、影响因素、控制方法^[12],发现在反应器中并没有形成明显的缺氧/好氧区域,而测试数据表明有高效脱氮效果,证明同时硝化/反硝化脱氮作用的存在。研究者对此从三个角度作了假设和解释,即反应器缺氧/好氧大环境理论;微生物絮体微环境理论;特定微生物存在的可能性;并利用对氧的控制实现了对同时硝化/反硝化的控制。高廷耀等对高污泥浓度低溶氧 A/O 工艺、倒置 A/A/O 工艺中的同时硝化/反硝化脱氮作用作了深入研究与探讨。结果表明影响同步硝化/反硝化的因素有溶解氧,污泥絮体结构以及污泥有机负荷。溶解氧控制在 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$,污泥浓度控制在 5 g/L 左右,并使污泥有机负荷维持在 $0.10 \sim 0.15 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 内,可以获得较好的同时硝化/反硝化效果。张

波则通过取消初沉池增加污泥颗粒、在好氧段放置填料、控制适当的溶解氧水平等手段实现了强化好氧段同时反硝化功能^[11, 18]。吴立波, 王建龙等^[19]采用投加各种悬浮填料载体构成的复合反应器进行了硝化/反硝化性能研究, 证明了同时硝化/反硝化的存在, 发现多孔载体上形成泥龄较长的小环境能提高污泥的硝化性能; 而因采用多孔填料污泥浓度较高, 更易形成反硝化所需的厌氧或缺氧微环境。通过控制反应器内的溶解氧(DO)可在局部形成一定的厌氧/缺氧环境, 使污泥具有反硝化活性。生物流化床被应用于脱氮, 由 Priyali Sen 等(1998)^[1]在中间性试验中实现了同时硝化/反硝化功能。为了实现并解释同时硝化/反硝化现象, 研究者提出了两个基本假设: 即同时硝化/反硝化分别由于反应器内微生物垂直分层和生物膜的分层(微环境)所造成。实验结果验证了微生物垂直分层引起同时硝化/反硝化现象的假说, 但不能排除这些区域内微环境的存在所起的作用。

此外, 对生物转盘、CAST工艺的同时硝化/反硝化效应以及同步硝化/反硝化的再线控制, 学者也进行了一定的研究和探讨^[20, 21, 23]。值得注意的是, 一些生物膜工艺及活性污泥法与生物膜工艺组合可以充分发挥微生物菌属和反应器的特性, 为同时硝化/反硝化创造有利的条件^[22, 23]。

3 结语

对同时硝化/反硝化脱氮技术的研究目前主要集中于探索什么样的工艺在何种条件下可获得良好的同时硝化/反硝化脱氮效果, 以及推导可模拟实验结果和帮助理解同时硝化/反硝化机理的数学模型。随着污水处理技术的发展, 对较有前景的生物反应器与工艺深入探讨实现同时硝化/反硝化的机理、影响因素、更系统地解决一些深层次问题(如有机污染物负荷、溶解氧、pH值、絮体特性等对脱氮效果的影响); 参与反应微生物种群、代谢特性, 将有助于污水生物脱氮技术的发展。

参考文献:

[1] Priyali Sen and Steven K. Dentel. (1998) Simultaneous nitrification - denitrification in a fluidized bed reactor, *Wat. Sci. Tech.*, 38(1), 247 ~ 254.
[2] Elisabeth V. Munch, etc. (1996) Simultaneous nitrification and deni-

trification in bench - scale sequencing batch reactors, *Wat. Res.* 30(2), 277 ~ 284.
[3] Mogens Henze, Poul Harremoës, Jes La Cour Jansen, Erik Arvin. (1997) *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*, Second Edition. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
[4] Klangduen Pochana and Jurg Keller. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). *Wat. Sci. Tech.*, 39(6), 61 ~ 68.
[5] Bertanza, G. (1997) Simultaneous Nitrification - Denitrification Process in Extended Aeration Plants: Pilot and Real Scale Experience. *Water Sci. Technol. (G.B.)*, 35, 53.
[6] Hong W. Zhao, etc. Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two - stage intermittent aeration process treating domestic sewage. *Wat. Res.* 33(4), 961 ~ 970.
[7] D. Patureau, N. Bernet, P. Dabert, etc. (1998) Physiological, molecular and modeling studies of an aerobic denitrifier: microvirgula aeradenitrificans use of its properties in an integrated nitrogen removal plant. *Wat. Sci. Tech.*, 38(1), 167 ~ 175.
[8] Robertson L. A., van Ntel E. W. J., Torremans R. A. M. and Kuenen J. G. (1998) Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of *Thiosphaera pantotropha*. *Appl. Environ. Microbiol.* 54(1), 2812 ~ 2818.
[9] Patureau, D., Davison, J. Bernet, N. and Moletta, R. (1994). Denitrification under various aeration conditions in *Comamonas Sp.*, strain SGLY2. *FEMS Microbiol. Ecol.* 14(1), 71 ~ 78.
[10] Patureau, D., Godon, J. J. et al. (1998) *Microvirgula aerodenitrificans*, gen. nov., sp. nov., a new Gram negative bacterium exhibiting co - respiration of oxygen and N - oxides up to oxygen saturated conditions. *Int. J. Syst. Bacteriol.*, in press.
[11] 高廷耀, 周增炎, 朱晓君. 生物脱氮工艺中的同步硝化反硝化现象[J]. 给水排水, 1998, 24(12), 6 ~ 9.
[12] G. T. Daigger, H. X. Littleton. Orbal 氧化沟同时硝化/反硝化及生物除磷的机理研究. *中国给水排水*, 1999, 15(3), 1 ~ 7.
[13] Munch, E. V., Lant, P. A. and Keller, J. (1996) Simultaneous nitrification and denitrification in bench - scale sequencing batch reactors. *Wat. Res.*, 30(2), 277 ~ 284.
[14] Yu, H.; Gu, G.; and Song, L. (1997) Posttreatment of Effluent from Coke - plant Wastewater Treatment System in Sequencing Batch Reactors. *J. Environ. Eng.*, 123, 305.
[15] Hyungseok Yoo et al. Nitrogen Removal From Synthetic Wastewater By Simultaneous Nitrification and Denitrification (SND) Via Nitrate in An Intermittently - Aerated Reactor. *Wat. Res.* 1999. 33(1): 145 ~ 154.
[16] Klangduen Pochana, Jurg Keller and Paul Lant. (1999) Model development for simultaneous nitrification and denitrification, *Wat. Sci. Tech.*, 39(1), 235 ~ 243.
[17] 李锋, 朱南文等. 有氧情况下同时硝化/反硝化的反应动力学模式. *中国给水排水*, 1999, 15(6), 58 ~ 60.
[18] 刘德君. 同步法脱氮技术可行性探讨[J]. 石油化工环境保护, 1997(1), 20 ~ 22.

- [19] 张波. 城市污水生物脱氮除磷技术工艺与机理研究[C]. 同济大学博士学位论文, 1996.
- [20] 吴立波, 王建龙等. 复合反应器污泥硝化与反硝化性能的研究[J]. 给水排水, 1999, 25(5), 15 ~ 17.
- [21] Masuda S., Watanabe Y. and Ishiguro M. (1991) Biofilm properties and simultaneous nitrification and denitrification in aerobic rotating biological contactors. Wat. Sii. Tech. 23, 1355 ~ 1363.
- [22] Gupta, S. K., Raja, S. M. and Gupta, A. B. (1994) Simultaneous nitrification and denitrification in a rotating biological reactor. Envi.

- Tech., 15, 145 ~ 153.
- [23] M. Fuerhacker, etc. (2000) Approach for a novel control strategy for simultaneous nitrification/ denitrification in activated sludge reactors, Wat. Res. 34. (9), 2499 ~ 2506.
- [24] Wartchow, D. (1990) Nitrification and denitrification in combined activated systems. Water Sci. Technol., 22(7/8), 199 ~ 206.
- [25] Watanabe, Y., Masuda S. and Ishiguro M. (1992) Simultaneous nitrification and denitrification in micro - aerobic biofilms. Water Sci. Technol., 26, 511 ~ 522.

《重庆环境科学》欢迎订阅来稿

《重庆环境科学》经过 22 年辛勤耕耘, 质量不断提高, 已成为在全国享有良好声誉的优秀期刊和全国中文核心期刊。2000 年又被评为“ 第一届全国环境保护期刊一等奖”, 还被纳入“ 中国科学引文数据来源期刊” 和“ 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”。

《重庆环境科学》属综合性环保科技期刊。辟有环境管理、环境评价、生态经济、可持续发展、污染防治、固体废弃物处置、综合利用、环保产业、监测分析等十多个栏目。主要刊登环境污染防治和监测分析的先进技术以及三废利用等科研成果; 交流环境管理、环境法制建设方面的先进经验; 探讨可持续发展、生态经济、城乡生态环境建设方面的理论与实践; 还报道国内外环保领域的最新动态。本刊可供有关领导、技术、经济、科研部门和企

事业单位中从事环保工作的管理干部和环境科研人员、大专院校师生等参阅。

《重庆环境科学》于 1999 年改版为国际标准大 16 开版, 系双月刊, 向国内外公开发行。国内统一刊号为 CN50-1117, 全国邮局均可订阅, 每期定价 5 元, 全年 30 元, 邮发代号 78-74; 国外由中国国际图书贸易总公司对外发行, 国外代号为 C4372。

编辑部地址: 重庆市江北区建新北路 130 号
 邮政编码: 400020
 电话(传真): (023) 67634264
 电子信箱: a67634051@cta.cq.cn
 开户银行: 重庆交通银行红旗河沟分理处
 帐号: 430149008512
 收款单位: 《重庆环境科学》杂志社

欢迎订阅《煤炭科技》杂志

《煤炭科技》是公开发行的综合性煤炭科技刊物, 国内统一刊号: CN32-1491/TD, 国际标准刊号: ISSN 1008-3731, 国内邮发代号: 28-175。作为中文矿业核心期刊之一, 本刊订户遍及全国 28 个省、市、自治区, 是我国煤炭系统有较大影响的科技期刊。

本刊专业全面, 着重刊登采掘、机电、建井、管理、选煤、通风安全等专业的科技论文, 跟踪国内外煤炭科技发展的新水平、新方向。可供煤炭科技、设计、生产、基建、地质勘探、煤矿机械制造及机修等各条战线的工程技术人员、技术工人、大专

院校及中等技校师生参考, 对矿山、冶金等地下工程专业也有参考价值。

本刊为季刊, 大 16 开本, 每册 5 元, 全年 20 元(免收邮资)。欢迎单位和个人订阅。欲订者请到当地邮局办理订阅手续, 亦可向本杂志社邮购。另外本社存有少量 1995 ~ 2000 年合订本, 每本 20 元(免收邮费), 款到即寄。现开始征订 2001 年合订本, 每本 20 元。

地址: 江苏省徐州市淮海西路 235 号
 邮政编码: 221006
 电话: (0516) 5320590