

文章编号:1000-582X(2006)09-0138-06

生物脱氮除磷新技术*

汤 琪^{1,2}

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆交通大学 理学院, 重庆 400074)

摘 要:综述了反硝化除磷技术的原理及其影响因素:pH值、溶解氧、污泥停留时间、MLSS值等的研究概况;硝化与反硝化技术的原理及其影响因素:碳源、溶解氧、絮凝体特性等的研究概况. 短程硝化反硝化技术的原理及其影响因素:温度、pH值、氨浓度、溶解氧等的研究概况以及厌氧氨氧化技术的原理及其影响因素:抑制物、pH值、温度等的研究概况. 并对反硝化除磷、同时硝化与反硝化、短程硝化反硝化、厌氧氨氧化等生物脱氮除磷新技术的相关工艺及其特点进行了评述.

关键词:生物脱氮除磷;反硝化除磷;同时硝化与反硝化;短程硝化反硝化;厌氧氨氧化

中图分类号:X524

文献标识码:A

随着中国工业化进程的加快,环境污染问题越来越突出,特别是含氮、磷等植物营养型污染物的超标排放,导致中国水体富营养化现象越来越严重. 对于中国水资源本来就十分短缺的国家,严格控制含氮、磷污水的超标排放是十分必要的. 生物脱氮除磷技术相对于其他方法的脱氮除磷技术有着很强的优势,因此生物脱氮除磷技术成为当前研究的热点.

1 生物脱氮除磷原理

1.1 生物脱氮原理

传统生物脱氮理论认为:水体中的有机氮在氨化菌的作用下,转化为氨态氮,水体中的氨态氮在好氧的条件下通过亚硝化菌和硝化菌转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,然后在缺氧的条件下,通过反硝化菌转化为 N_2 .

而近来的一些研究发现:在好氧的条件下发生了同时硝化和反硝化作用;在厌氧的条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 减少. 这些现象都无法用传统生物脱氮理论来解释,表明除了传统的生物脱氮理论外,还存在其他的生物脱氮原理.

1.2 生物除磷原理

传统生物除磷理论认为:在厌氧的条件下,聚磷菌把细胞中的聚磷水解为正磷酸盐释放胞外,并从中获取能量,并利用污水中易降解的有机物,如挥发性脂肪

酸(VFA),合成储能物质聚B-羟基丁酸(PHB)等储于细胞内,在好氧的条件下,聚磷菌以游离氧为电子受体,氧化细胞内储存的PHB,并利用该反应产生的能量,过量从污水中摄取磷酸盐,合成高能ATP,其中一部分又转化为聚磷,作为能量储于细胞内,好氧吸磷大于厌氧释磷量,通过排放富磷污泥可以实现高效除磷目的.

而近来的一些研究发现,在缺氧条件下,部分聚磷菌利用 NO_3^- 作为电子受体氧化胞内储存的PHA,并从环境中摄磷实现同时反硝化和过度摄磷,即反硝化除磷现象.

2 生物脱氮除磷新技术及其工艺

基于传统生物脱氮除磷原理发展的生物脱氮除磷工艺有A/O工艺, A^2/O 工艺,VIP工艺,UCT工艺,MUCT工艺,JHB工艺等,这些工艺都是研究者们根据厌氧、缺氧、好氧等池子的排列数量及混合液循环和回流方式的变化开发出的一系列工艺. 此外,还有通过对曝气供氧的控制,在空间和时间上形成厌氧与缺氧环境的SBR工艺和氧化沟工艺. 这些工艺都是尽可能将除磷和脱氮过程分开以排除除磷和脱氮过程的相互干扰,如硝酸盐对释磷的影响;反硝化与释磷对碳源的竞争,硝化菌和聚磷菌的泥龄不同等矛盾.

近年来,国内外研究者们对不同于传统生物脱氮

* 收稿日期:2006-04-17

基金项目:重庆交通大学青年科学基金资助项目(2005(36))

作者简介:汤琪(1970-),男,重庆长寿人,重庆大学博士研究生,重庆交通大学讲师,主要从事污水处理技术的研究.

除磷理论的反硝化除磷,同时硝化及反硝化,短程硝化反硝化,厌氧氨氧化等新技术及其相关工艺进行了大量的研究.

2.1 反硝化除磷

反硝化除磷是一些聚磷菌在缺氧的条件下,以硝酸盐作电子受体,过度摄磷,从而实现反硝化除磷的脱氮除磷过程,关于反硝化除磷的解释有2种假设:1)类菌属学说^[1],即生物除磷系统中的聚磷菌(PAO)可分为2类菌属,其中一类PAO只能以氧气作电子受体,而另一类则既能以氧气又能以 NO_3^- 作电子受体,因此此类PAO在吸磷的同时也能进行反硝化.2)一类菌属学说^[2],即在生物除磷系统中只存在一类PAO,它们在一定程度上都具有反硝化能力,其能否表现出来的关键在于厌氧/缺氧这种交替环境是否得到强化.而J. Y. HU等^[3]证实PAO有3类,一类只能以 O_2 为电子受体,另一类能以 O_2 与 NO_3^- 为电子受体,还有一类能以 O_2 与 NO_3^- , NO_2^- 为电子受体.

2.1.1 反硝化除磷工艺

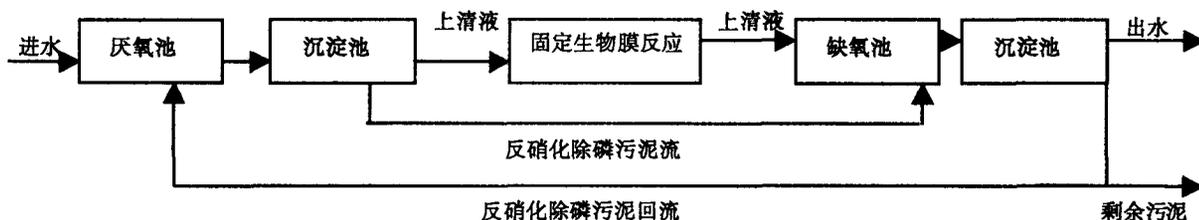


图1 DEPHANOX工艺流程图

王亚宜等^[8]研究中提到的 A_2N 工艺,实质上就是Dephanox工艺,课题组对 A_2NSBR 工艺进行了大量的研究. A_2NSBR 工艺由 $\text{A}^2/\text{O}-\text{SBR}$ 反应器和 $\text{N}-\text{SBR}$ 反应器组成. $\text{A}^2/\text{O}-\text{SBR}$ 反应器的主要功能是去除COD和反硝化除磷; $\text{N}-\text{SBR}$ 反应器主要起硝化作用.这2个反应器的活性污泥是完全分开的,只将各自沉

1) DEPHANOX 工艺

DEPHANOX工艺是Bortone G等^[4]于1996年提出的一种工艺,如图1.实质上是Wanner工艺的另一称谓,Wanner工艺是1992年捷克的Wanner等^[5]首次采用交替的厌氧和缺氧条件并结合单独的固定生物膜,来实现生物除磷的思想,并将其运用到反硝化除磷工艺中.

该工艺在厌氧池和缺氧池之间增加了沉淀池和固定膜反应池,污水在厌氧池中释磷,在沉淀池中进行泥水分离,含氮较多上清液进入固定膜反应池进行硝化,污泥则跨越固定膜反应池进入缺氧段,完成反硝化除磷^[6].该工艺具有能耗低,污泥产量低且COD消耗量低的特点.但该工艺中磷的去除效果很大程度上取决于缺氧段硝酸盐的浓度,当缺氧段硝酸盐不充足时,磷的过量摄取受到限制;反之硝酸盐又会随回流污泥进入厌氧段,干扰磷的释放和聚磷菌体的PHB的合成^[7].

淀后的上清液相互交换.该工艺的基本原理与Dephanox工艺类似.

2) BCFS 工艺

BCFS工艺是荷兰代尔夫特工业大学Kluyver生物技术实验室研发的一种变型的UCT工艺^[9-10],如图2所示.

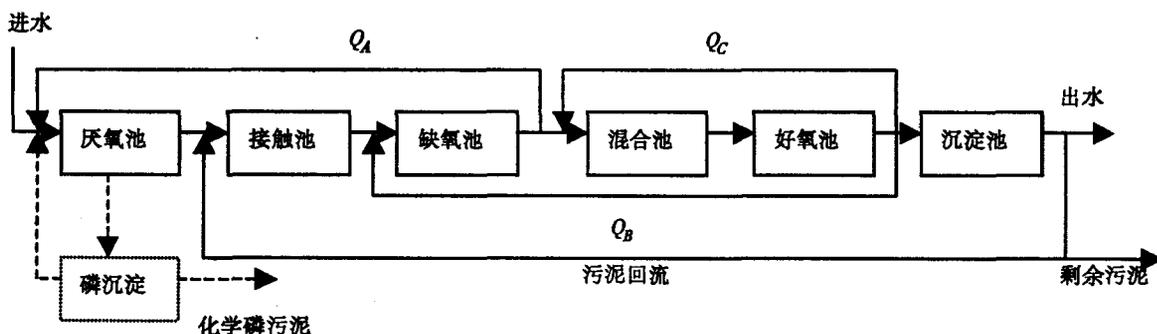


图2 BCFS工艺流程图

BCFS工艺较UCT工艺增加了2个反应池,第一个增加的反应池介于厌氧池与缺氧池中间,起到选择器的作用,可以吸附剩余的COD,同时迅速反硝化来

自回流污泥的硝酸氮,可防止丝状菌的生长.第二个反应池是混合池(缺氧或好氧),介于UCT工艺缺氧池与好氧池之间,目的是形成低氧环境以获得同时硝化与

反硝化,从而保证出水含有较低的总氮浓度。

与 UCT 工艺相比,BCFS 工艺增加了 2 个内循环 QB 和 QC,从好氧池设置内循环 QB 到缺氧池十分重要,起辅助回流污泥向缺氧池补充硝酸盐的作用。内循环 QC 的设置能在好氧池与混合池间建立循环,以增加硝化或同时硝化与反硝化的机会,为获得良好的出水氮浓度创造条件。

BCFS 工艺的主要特点有:1)对氮、磷的去除率高。2)SVI 值低(80~120 mL/g)且稳定。3)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。4)与常规污水厂相比,其污泥量减少 10%。5)利用反硝化聚磷菌(DPB)实现生物除磷,使碳源(COD)能被有效地利用,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。6)可回收磷^[11]。

2.1.2 反硝化除磷技术的研究概况

影响反硝化除磷技术的因素有:COD/N 和 COD/P 值,NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 浓度;pH 值;MLSS 值,溶解氧(DO)浓度;污泥停留时间(SRT)等因素。国内外研究者对该技术进行了大量的研究。

Kuba 等^[12]在对 MUCT 工艺型的污水处理厂研究得出,污水处理过程确实发生了反硝化除磷过程,并且其中一个污水处理厂中 MLVSS 的 30%~50% 是聚磷菌,其中 50% 的磷的去除是通过反硝化除磷的过程。Kuba 等^[6]在研究 A₂N 工艺时,得出仅耗费 400 mg-COD/L HAc 就可以去除 15 mg P/L 和 105 mg N/L。可节约 50% 和 30% 的 COD 与耗氧量,相应减少剩余污泥 50%。并且得到 COD/N 的最佳比值是 3.4g COD/g N。Kuba 等^[13]在 5 种不同的 pH(6.0~8.0)下,对 DPB 在厌氧段的释磷量和 HAc 消耗量进行了测定,pH 分别为 6,7,8 时测定 P/C(释磷量/HAc 消耗量)的比值,污泥浓度为 2.7 gVSS/L 时,所得值分别为 0.7,1.1 和 1.2,污泥浓度为 4.2 gVSS/L 时,所得值分别为 0.9,1.3 和 1.2。DPB 厌氧状态释磷的适宜 pH 为 6.0~7.5。M. Merzovki 等^[14]用 A₂SBR 硝化反应器反硝化除磷系统对预处理后的屠宰场废水进行处理,可达到 COD, N-NH₄⁺ 和 P-PO₄³⁻ 去除率分别达到 99%, 85%, 99%。Kuba 等^[15]研究指出反硝化聚磷菌可用厌氧—缺氧的 SBR 反应器中得到富集,富集后在厌氧—缺氧—好氧的反应器中实现 N、P 的去除,O₂ 对反硝化除磷无有害影响。

李勇智等^[16-17]采用 SBR 反应器,研究了以硝酸盐作为电子受体的反硝化除磷过程,结果表明反硝化聚磷菌存在于传统的强化生物除磷体系中,通过厌氧/好氧交替运行方式反硝化聚磷菌在聚磷菌中的比例从

13.3% 上升到 69.4%,稳定运行的厌氧/缺氧 SBR 反应器具有良好的强化生物除磷和反硝化脱氮性能,缺氧结束时,体系中磷浓度小于 1 mg/L,除磷效率大于 89%。研究还表明:进水 COD 浓度对反硝化除磷的效率影响很大,在 COD 浓度 < 180 mg/L 时,进水 COD 浓度越高,除磷效率也就越高,较高浓度的进水 COD 浓度将导致有剩余的 COD 进入缺氧段,对反硝化吸磷构成不利影响。污泥龄为 16 d 时,厌氧/缺氧 SBR 反应器取得稳定和理想的反硝化除磷效果。污泥龄减少到 8 d,由于反硝化聚磷菌的流失导致反硝化除磷效率的下降。袁林江等^[18]采用 SBR 反应器和人工合成废水研究了同步反硝化聚磷的条件和影响因素。结果表明:厌氧/好氧方式下驯养的生物除磷污泥,在厌氧期之后供给硝酸盐,则污泥可以很快实现同步反硝化聚磷,聚磷前厌氧阶段的存在是实现反硝化聚磷必不可少的重要前提。在厌氧(2 h)—缺氧(1 h)—好氧(2 h)的试验条件下,当 NO₃⁻-N 浓度由 5 mg/L 上升到 20 mg/L 时,其反硝化聚磷效率由 11.9% 上升至 48.7%,但提高到 20 mg/L 以上时,其效率提高得不是很明显,好氧段的存在不会使诱导形式的反硝化聚磷(DNPA)消失,但缩短好氧时间有助于提高 DNPA 在除磷中的比例。

王亚宜等^[8,19]对 A₂N(厌氧/缺氧和硝化)连续流反硝化除磷脱氮的双泥工艺进行了研究。结果表明:A₂N 工艺对 TN,TP 和 COD 的去除率分别达到了 92.6%, 98% 和 95%,试验过程中还发现 COD/TP,硝酸盐浓度,MLSS 和 SRT 等因素对系统的脱氮除磷效果有较大影响。当进水 COD/TN 在 3.94~7 变化时,反硝化除磷较好,除磷率稳定在 87.03%~92.95%,脱氮率从 80.99% 提高到了 92.70%,而当 COD/TN 达到 9.6 以后,系统脱氮效果稳定在 92% 以上,除磷率降至 74% 以下,TP 去除量中反硝化吸磷比率下降,好氧吸磷比率升高,将外碳源投加在缺氧段,只能优先支持反硝化脱氮反应,而对缺氧吸磷有抑制作用。

2.2 同时硝化与反硝化

在一定条件下,硝化与反硝化反应发生在同一处理条件及同一处理空间内,称为同时硝化与反硝化(SND),SND 具有以下优点:1)能有效保持反应器中 pH 稳定,减少或取消碱度的投加。2)减少传统反应器的容积,节省基建费用。3)对于仅由一个反应池组成的序批式反应器来讲,SND 能够降低实现硝化、反硝化所需时间。4)曝气量的节省,能够进一步降低能耗。对于同时硝化与反硝化的反应机理初步的解释包括:反应器溶解氧分布不均理论,缺氧微环境理论和生物学理论^[20]。

目前对 SND 技术的研究主要集中在序批式反应器(SBR)、生物转盘反应器(RBC)、生物流化床、氧化沟等。其中以 SBR 反应器中 SND 工艺研究最多,影响 SND 的因素有:碳源、溶解氧、絮凝体特性等。

Klangduen Pochana 等^[21]应用 SBR 工艺处理屠宰废水,通过 SND 可达到总氮 95% 的去除率,外加乙酸作碳源时,可明显增加 SND,并指出:溶解性有机物(COD)、溶解氧(DO)、活性污泥絮体尺寸是影响 SND 的主要因素,较大的絮体尺寸有利于 SND,增加溶解氧浓度对 SND 有负面影响,但在溶解氧升至 0.8 mg/L 以前,这种效应不明显。Christine Helmer 等^[22]研究指出在生物膜体系中,当溶解氧浓度为 1 mg/L 时,发生了同时硝化与反硝化,并且以 NO_2^- 为电子受体。Elisabeth Munch 等^[23]研究 SBR 反应器得出,当溶解氧浓度为 0.5 mg/L 时,可发生完全的 SND。Hisashi Satoh 等^[24]研究单污泥体系中,用微电极测定记录到污泥中存在缺氧区,硝化发生在好氧区,而反硝化发生在缺氧区,当 O_2 浓度为 10~35 μM 时,可发生 SND,这就在一定程度上证实了 SND 可以由缺氧微环境理论来解释。

冯叶成等^[25]在培养和富集硝化菌的基础上,在 SBR 反应器中通过控制溶解氧浓度(0.5~1 mg/L)观察到同时硝化反硝化现象的存在,进水氨氮投加浓度为 50 mg/L 和 100 mg/L 的 2 个实验组,总氮分别有 58.4% 和 62.6% 损失,还根据试验结果推测 SND 可能是某种自养菌在发挥作用。张鹏等^[26]研究得出:在 DO 为 0.3~0.8 mg/L, pH 控制在 7.5~8.0, 温度为 20~28 $^{\circ}\text{C}$ 时,完全混合系统确实发生了同时硝化与反硝化,获得最佳运行条件为:泥龄为 45 d, C/N 比为 10; F/M 为 0.1 g(COD_{Cr})/[g(MLSS)·d]。在最佳运行条件下, COD_{Cr} 和氨氮的去除率分别为 88% 和 100%, 总氮的去除率达 70%。

2.3 短程硝化反硝化

短程硝化反硝化是将硝化控制在 NO_2^- 阶段而终止,随后进行反硝化。短程硝化反硝化可节省氧供应量约为 25%, 降低能耗,节省碳源 40%,减少污泥生成量可达 50%,减少投碱量,缩短反应时间和减少容积,但短程硝化反硝化的缺点是不能长久稳定地维持 NO_2^- 积累^[27]。短程硝化反硝化工艺尤其适用于低碳氮比、高氨氮、高 pH 值和高碱度废水的处理。实现短程硝化和反硝化的关键在于抑制硝酸菌的增长,从而使亚硝酸盐在硝化过程中得到稳定的积累^[28]。

影响短程硝化反硝化的因素有温度、pH 值、氨浓度、DO 等。Hyungseok Yoo 等^[29]对间歇曝气循环单污

泥系统中的同时短程硝化与反硝化进行了研究,指出 DO、pH、FA、FH、温度、曝气时间长短等因素都影响同时短程硝化与反硝化,体系的最低 DO 浓度为 0.4 mg/L 左右,最高 DO 为 2.0~2.5 mg/L,低于 1.0 mg/L 时主要发生反硝化作用,高于 1.0 mg/L 时主要发生硝化作用。李勇智等^[28]采用序批式反应器(SBR)对制药废水的短程硝化反硝化技术进行了研究。结果表明,在常温(23±1) $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,实现了低碳氮比制药废水的短程硝化反硝化,脱氮效率达 99% 以上。在高游离氨条件下,硝酸菌比亚硝化菌对游离氨更为敏感,反应体系中亚硝酸盐的平均积累速率远大于硝酸盐的平均积累速率,并可利用 pH 值变化的特征来准确判断硝化和反硝化过程的结束。高大文等^[30]在 SBR 反应器中,以豆制品废水为研究对象,控制体系温度在 31±0.5 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,实现了短程硝化反硝化, $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的比率始终维持在 90% 以上,并指出曝气时间对硝化效果影响较大。陈立伟等^[31]对连续混合反应器处理 VE 生产废水的短程硝化反硝化进行了研究,结果表明,当溶解氧浓度为 0.85 mg/L 时的亚硝化率($\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NO}_x^- - \text{N}$)为 18.9%,远远大于溶解氧为 2.65 mg/L 时的 1.13%,通过对回流污泥 12 h 的缺氧选择处理,出水中的 NO_2^- 由原来的 2.5 mg/L 上升到 25.6 mg/L,相应的污泥中亚硝化细菌与硝化细菌的数量比值由 0.45 提高到 2.44,在进水中投加 5~10 mg/L 的 ClO_3^- 能够使污泥中硝酸细菌的活性受到明显的抑制。

短程硝化反硝化的工艺有 SHARON 工艺和 CANON 工艺。SHARON 工艺是荷兰 Delft 大学开发的脱氮新工艺^[32],其基本原理是将氨氧化控制在亚硝化阶段,然后进行反硝化,即实现短程硝化反硝化。该工艺的核心是应用硝化菌和亚硝化菌的不同生长速率,即在高温(30~35 $^{\circ}\text{C}$)下亚硝化菌的生长速率明显高于硝酸菌这一固有特性,控制系统的水力停留时间和反应温度,从而使硝酸菌被自然淘汰,反应器中亚硝化菌占优势,使氨氮控制在亚硝化阶段。CANON 工艺(生物膜内自养脱氮工艺)实质上是通过对生物膜内溶解氧的浓度实现短程硝化反硝化,使生物膜内聚集的亚硝化菌和 ANAMMOX 微生物能同时生长,满足生物膜内一体化完全自养脱氮工艺的实现条件。

2.4 厌氧氨氧化

厌氧氨氧化就是利用微生物的生化作用,以 NH_4^+ 还原 NO_2^- 和 NO_3^- ,最终达到去除水体中氮元素的目的。其优点在于不需要外加有机物作为电子供体,节省中和试剂,无二次污染,节省供养能耗,运行费用低。

厌氧氨氧化正在开发的工艺有 ANAMMOX 和

OLAND 工艺 2 种. ANAMMOX 工艺是由荷兰 Delft 技术大学 Kluyver 生物技术实验室开发的新工艺. 该工艺的原理是厌氧条件下, 以 NO_2^- 和 NO_3^- 作为电子受体, 将氨转化为氮气^[33]. OLAND 工艺由比利时 Gent 微生物生态实验室开发, 该工艺的关键是控制溶解氧, 使硝化过程仅进行到 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 阶段, 由于缺乏电子受体, 由 NH_4^+ 氧化产生的 NO_2^- 氧化未反应的 NH_4^+ 形成 N_2 ^[34].

影响厌氧氨氧化反应的因素有抑制物、pH 值、温度等, 对厌氧氨氧化反应的抑制作用主要有基质抑制、 O_2 抑制等. 其最适 pH 值范围在 6.7 ~ 8.3 范围内, 其最佳温度为 40 °C^[35] 胡宝兰等^[36] 利用上流式厌氧污泥床作为厌氧氨氮反应器, 取得对 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 的良好去除率. Jetten 等^[27] 将 ANAMMOX 工艺与 SHARON 工艺结合, 对污泥硝化出水进行研究, 实验结果表明氨态氮的去除率能达到 83%.

3 结 语

反硝化除磷、同时硝化与反硝化、短程硝化反硝化、厌氧氨氧化等生物脱氮除磷技术都是突破传统生物脱氮除磷原理基础上发展起来的新技术, 都是朝着经济、高效、低耗的可持续方向发展的生物脱氮除磷新技术. 研究者们对这些新技术已进行了较为深入的研究. 并且, 有些新技术都已经运用于实践中. 但这些新技术的原理、工艺还不够成熟, 其原理、工艺及其影响因素还有待于进一步的研究.

参考文献:

- [1] KUBA T, VAN LOOSDRECHT MCM. Phosphorus Removal from Waste Water by Anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. *Wat Sci Tech*, 1993, 27(5-6): 241-252.
- [2] WACHTMEISTER A, KUBA T. A Sludge Characterization Assay for Aerobic and Denitrifying Phosphorus Removing Sludge [J]. *Wat Res*, 1997, 31(3): 471-478.
- [3] HU J Y, ONG S L, NG W J, A New Method for Characterizing Denitrifying Phosphorus Removal bacteria by Using the Different Types of Three Electron Acceptors [J]. *Water Research*, 2003, (37): 3 463-3 471.
- [4] BORTONE G. BIOLOGICAL Anoxic Phosphorus Removal the Dephanox Process [J]. *Wat Sci Tech*, 1996, 34(1-2): 119-128.
- [5] WANNER J. New Process Design for Biological Nutrient Removal [J]. *Wat Sci Tech*, 1992, 25(4/5): 445-448.
- [6] KUBA T, MCM, Van Loosdrecht. Phosphorus and Nitrogen Removal with Minimal COD Requirement by Intergration of Denitrifying Dephosphatation and Nitrification in a Two-sludge System [J]. *Wat Res*, 1996, 30(7): 1 702-1 710.
- [7] SORM P. Phosphorus Uptake Under Anoxic Condition and Fired Film Nitrication in Nutrient Removal Activated Sludge [J]. *Wat Res*, 1996, 30(7): 1 573-1 584.
- [8] 王亚宜, 杜红, 彭永臻. A_2N 反硝化除磷脱氮工艺及其影响因素 [J]. *中国给水排水*, 2003, 19(9): 8-11.
- [9] MCM VAN LOOSDRECHT, BRANDES F A, A C de Vries. Upgrading Wastewater Treatment Process for Integrated Nutrient Removal-the BCFS Process [J]. *Wat Sci Tech*, 1998 37(9): 209-217.
- [10] 郝晓地, 汪慧贞, Mark Van Loosdrecht. 可持续除磷脱氮 BCFS 工艺 [J]. *给水排水*, 2002, 28(9): 7-9.
- [11] 马勇, 彭永臻, 王晓莲. 新型高效反硝化除磷工艺 [J]. *环境污染与防治*, 2004, 26(1): 51-53, 62.
- [12] KUBA T. MCM. VAN LOOSDRECHT, BRANDSE F A. Occurrence of Denitrifying Phosphorus Removal Bacteria in Modified UCT-type Wastewater Treatment Plants [J]. *Wat Res*, 1997, 31(4): 777-786.
- [13] KUBA T. MCM VAN LOOSDRECHT. HEIJNEN J J. Biological Dephosphatation by Activated Sludge Under Denitrification Conditions: pH Influence and Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Full-scale Wastewater Treatment Plant [J]. *Wat Sci Tech*, 1997, 36(12): 75-82.
- [14] MERIOUKI M. BERNET N, DELGTNES J P. Effect of Pre-fermentation on Denitrifying Phosphorus Removal in Slaughterhouse Wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2005 (96): 1 317-1 322.
- [15] KUBA T, MCM VAN LOOSDRECHT. HEIJNEN J J. Effect of Cyclic Oxygen Exposure on the Activity of Denitrifying Phosphorus Removal Bacteria [J]. *Wat Sci Tech*, 1996, 34(1-2): 33-40.
- [16] 李勇智, 彭永臻, 王淑滢, 等. 强化生除磷体系中的反硝化聚磷 [J]. *中国环境科学*, 2003, 23(5): 543-546.
- [17] 李勇智, 彭永臻, 王淑滢. 厌氧/缺氧 SBR 反硝化除磷效能的研究 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(6): 9-12.
- [18] 袁林江, 张小玲, 韩玮, 等. 同步反硝化聚磷的试验研究 [J]. *环境科学*, 2004, 25(6): 92-96.
- [19] 王亚宜, 彭永臻, 李探微, 等. A_2N 连续流双泥系统反硝化除磷脱氮试验研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(8): 1 046-1 049.
- [20] 杨殿海, 王峰, 夏四清. 废水处理工艺中同步硝化/反硝化研究进展 [J]. *上海环境科学*, 2003, 22(12): 878-882.
- [21] KLANG DVEN POCHANA, JURG KELLER. Study of Factors Affecting Simultaneous Nitrification and Denitrification (SND) [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 39(6): 61-68.
- [22] CHRISTIME HELMER, SABINE KUNST. Simultaneous Nitrification/denitrification in an Aerobic Biofilm System [J]. *Wat Sci Tech*, 1998, 37(4-5): 183-187.
- [23] ELISABETHV MUNCH, PAVL LANT, JURG KELLER. Simultaneous Nitrification and Denitrification in Benchscale Sequencing Batch Reactors [J]. *Wat Res*, 1996, 30(2): 277-284.
- [24] HISASHI SATOH, YOSHIUKI NAKAMURA, HIDEKI ONO. Satoshi Okabe. Effect of Oxygen Concentration on Nitrification and Denitrification in Single Activated Sludge Floes [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, 83(5): 604-607.
- [25] 冯叶成, 王建龙, 钱易. 同时硝化反硝化的试验研究 [J]. *上海环境科学*, 2002, 21(9): 527-529.

- [26] 张鹏,周琪. 低氧条件下完全混合系统同时硝化和反硝化的试验研究[J]. 上海环境科学,2003,22(11):755-759.
- [27] 张蔚萍,陈建中. 低碳高浓度含氮废水的生物脱氮技术[J]. 环境保护,2003,6:20-21.44.
- [28] 李勇智,彭永臻,王淑莹,等. 采用序批式反应器短程生物脱氮工艺处理高氨氮制药废水[J]. 现代化工,2003,23(增刊):163-166.
- [29] HYUNGSEOK YOO, KYU-Hong AHN, HYUNG-JIB Lee. Nitrogen Removal from Synthetic Wastewater by Simultaneous Nitrification and Denitrification(SND) via Nitrite in an Intermittently-aerated Reactor[J]. Wat Res, 1999, 33(1): 145-154.
- [30] 高大文, 彭永臻, 潘威. SBR法短程硝化-反硝化生物脱氮工艺的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(6):1-4.
- [31] 陈立伟,蔡天明,李顺鹏. VE生产废水的短程硝化反硝化研究[J]. 环境工程,2004,22(4):7-9.
- [32] JETTEN MSMI. Towards a more Sustainable Municipal Wastewater Treatment System[J]. Wat Sci Tech,1997,35(9):171-180.
- [33] STRAOUS M. Ammonium Removal from Concentrated Waste Streams with the Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Process in Different Configurations [J]. Wat Res, 1997,31:1 955-1 962.
- [34] 王建龙. 生物脱氮新工艺及其技术原理[J]. 中国给水排水,2000,16(2):25-28.
- [35] 杨岚,杨景亮,李再兴,等. 厌氧氨氧化技术研究进展[J]. 河北化工,2004,3:54-56.
- [36] 胡宝兰. 新兴生物脱氮技术工艺的研究[J]. 应用与环境生物学报,1999,5(4):68-73.

Advance in New Technology of Biological Nutrient Removal

TANG Qi^{1,2}

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Science College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: General situation studying on new technology of biological nutrient removal is summarized, such as the principle of denitrifying dephosphataion and factors affecting it, such as pH, DO, SRT, MLSS etc. The principle of simultaneous nitrification and denitrification and factors affecting it are given, such as carbon source, DO, the property of activated sludge ect. The principle of shortcut nitrification -denitrification and factors affecting it is also given such as temperature, pH, the concentration of ammonia, DO etc. The principle of anaerobic ammonium oxidation and factors affecting it is proposed such as stayer, pH, temperature etc. The technics and its peculiarity of these new technology of biological nutrient removal is commented.

Key words: biological nutrient removal; denitrifying dephosphataion; simultaneous nitrification and denitrification; shortcut nitrification - denitrification; anaerobic ammonium oxidation

(编辑 陈移峰)

(上接第133页)

Analytic Solution of Second Order Effects Regular Pattern in Non-Sway Closed Cell Frame

ZHU Zhan-you, LIU Yi, LI Zhan-ping, BAI Shao-liang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The regular pattern of second order effects according to numerical analysis results in non-sway closed cell frame columns is reviewed. The second order internal force equation and additional displacement method based on the turn-angle equation are provided in second order effects analysis. The analytic solution of second order effects in non-sway closed cell frames is solved by this method, which has proved that the regular pattern of second order effects in non-sway closed cell frame columns is exact.

Key words: P- δ effects, Non-sway closed cell frames, additional displacement method

(编辑 姚飞)