

江苏高校优势学科建设工程资助项目

序批式膜生物反应器 脱氮除磷工艺

张传义 何士龙 袁丽梅 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏高校优势学科建设工程资助项目

序批式膜生物反应器 脱氮除磷工艺

张传义 何士龙 袁丽梅 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书评述了污水脱氮除磷领域的研究进展,提出了一种厌氧—交替好氧/缺氧—膜生物反应器(SMBR)污水脱氮除磷工艺,重点考察了 SMBR 工艺在不同运行条件的污染物去除效能,优化了 SMBR 运行过程中的操作参数,解析了膜污染机理与控制措施,并建立相关动力学方程,为 SMBR 工艺的实际应用提供了科学依据。本书可供环境工程、环境科学、给排水等专业的高年级本科生、研究生及老师阅读,也可供从事相关领域的研究和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

序批式膜生物反应器脱氮除磷工艺 / 张传义, 何士龙, 袁丽梅著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2014. 11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2539 - 9

I. ①序… II. ①张… ②何… ③袁… III. ①污水处理—生物膜反应器—研究 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 261803 号

书 名 序批式膜生物反应器脱氮除磷工艺

著 者 张传义 何士龙 袁丽梅

责任编辑 章 毅 何晓明

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 9 字数 220 千字

版次印次 2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

水体富营养化是一个全球性的环境问题,它是由于水体中氮、磷含量超标导致藻类过度繁殖引起的。为了进一步降低氮磷对水环境造成的危害,许多国家和地区立法对污水中氮、磷等指标制定了新的排放标准。如我国颁布的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)明确规定了较为严格的 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的排放标准分别为: $\text{TP} \leq 0.5 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N} \leq 5 \text{ mg/L}$, $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ (一级 A 标准)。目前国内建成的大多二级污水处理厂均有不适应新标准要求的问题,面临着严峻的改造任务。为进一步提高城市污水的脱氮除磷效果,防治水体富营养化,研究开发经济高效的城市污水(尤其是低碳源城市污水)除磷脱氮新技术具有重要的实践意义。

现有的生物脱氮除磷工艺基本是在传统生物脱氮除磷理论基础上进行构建的。其主要缺点有:工艺流程中包含多种污泥和混合液的回流,加大系统操作的复杂性,提高了基建和运行费用,且生物脱氮除磷过程对能源(如 COD、 O_2)消耗较多;同一系统中存在多种微生物的相互影响,制约了工艺的高效性和稳定性;剩余污泥产量较大,且磷含量较高,不易处理。以上这些都不符合环境可持续发展的要求。随着生物脱氮除磷理论和技术研究深入,处理效率高、工艺简洁、能耗较低的组合新工艺将成为污水脱氮除磷工艺的发展趋势。近年来,反硝化除磷技术的研究和开发,为解决上述问题提供了有效的解决途径,成为当前水处理领域的研究焦点。

反硝化除磷技术是利用反硝化聚磷菌(DPAOs)在缺氧的条件下利用硝酸盐作为电子受体进行反硝化除磷,实现了脱氮和除磷过程的耦合,反硝化和除磷过程的有机结合从根本上解决了传统生物脱氮除磷工艺中脱氮和除磷两个过程在碳源竞争问题上的矛盾。由氮的转化途径可知,反硝化过程中会有亚硝酸盐的出现,当亚硝酸盐浓度较低时,其可作为 DPAOs 的电子受体进行反硝化除磷。从化学计量学上分析,利用亚硝酸盐作为电子受体进行反硝化除磷的亚硝化—反硝化除磷可缩短传统反硝化除磷的路径,节省 40% COD 和 25% O_2 消耗,同时具有周期短、吸磷和放磷速度快的特点。与传统的生物除磷技术相比,短程硝化反硝化除磷在脱氮除磷过程中更加节省碳源和能源,因此被誉为“可持续生物除磷脱氮工艺”。在当今城市污水氮磷处理方面具有很明显的优越性,具有很大的发展潜力。

本书采用序批式的运行方式强化膜生物反应器的脱氮除磷效能,通过 SBR 灵活的控制方式和膜的高效截留作用,使得在单一反应器内依次形成“厌氧—交替好氧/缺氧—好氧(膜出水)”的环境,创造在一个反应器内有利于(短程)硝化菌和反硝化除磷菌生长的

环境,实现(短程)硝化、反硝化聚磷菌的富集及脱氮除磷功能的强化,最终达到以(亚)硝化反硝化除磷为主的同步脱氮除磷的目的,为改良现有生物脱氮除磷工艺提供一个新思路。

本书主要研究了 SBR 工艺在不同操作条件(SRT、交替好氧/缺氧时间和溶解氧)下的污染物去除效能、污泥特性、膜污染及其控制等指标,主要研究成果如下:

① 在 A/O 模式运行的条件下,当 SRT 由 20 d $\rightarrow$ 40 d 时,系统对 COD、NH₃-N 和 TN 去除效率变化不大;而对 TP 去除变化较大,污泥含磷率和反硝化除磷菌比例随着 SRT 的增大而增加。

② 厌氧—交替好氧/缺氧—序批式膜生物反应器[A-(O/A)ⁿ-SBR](T=3 h)工艺具有良好的运行效能,交替好氧/缺氧的运行方式实现了多级硝化/反硝化(除磷)交替进行,强化了污染物的去除效能、提高了反硝化除磷性能、引起了污泥产率下降。

③ 在 A-(O/A)ⁿ-SBR 处理低碳源污水时,DO 越低,NO₂⁻抑制缺氧反硝化吸磷的阈值越大,NO₂⁻可作为聚磷菌除 O₂ 和 NO₃⁻以外的电子受体进行吸磷;系统中存在 PO、PON_n、PON 和 PON_n 共四类 PAOs,DO 的变化对 PAOs 的构成有较大影响。

④ 膜污染的研究表明:控制 TMP $\leq$ 30 kPa 下的“氧化剂(3%NaClO)+盐酸(pH=1~2)”交替在线化学清洗模式对膜过滤性能恢复良好;NaClO 对凝胶层的去除效果较好,HCl 可有效去除钙、镁、铝等无机离子形成的垢粒;小粒子特别是小于 10 μ m 的粒子对膜污染的贡献最大,膜污染阻力构成中,泥饼层、有机凝胶层和无机垢层分别占 60%~70%、20%~30%和 5%~10%。

⑤ 根据 Monod 方程,建立了 A-(O/A)ⁿ-SBR 工艺的污染物去除动力学方程,求出了针对不同污染物的动力学参数(K_s,V_{max}),采用 Matlab 程序软件对动力学方程进行数值求解,利用该模型可为 A-(O/A)ⁿ-SBR 工艺的参数优化提供理论依据。

由于笔者水平有限,书中不足甚至纰漏之处在所难免,敬请同行专家和学者批评指正。

笔 者
2014 年 8 月

目 录

1 绪论	1
1.1 废水生物脱氮除磷的基本原理	1
1.2 生物脱氮除磷工艺	3
1.3 生物脱氮除磷技术的研究进展	8
1.4 膜生物反应器技术	15
1.5 研究目的与内容	20
1.6 研究技术路线	22
2 A/O—SMBR 工艺运行特性	23
2.1 材料与方法	23
2.2 不同 SRT 下 A/O—SMBR 系统的运行特性	28
2.3 周期试验分析	33
2.4 厌氧历时对释磷的影响	35
2.5 反硝化除磷性能分析	36
2.6 本章小结	37
3 A—(O/A) ⁿ —SMBR 工艺运行特性	38
3.1 A—(O/A) ⁿ —SMBR 工艺的理论基础	38
3.2 材料与方法	40
3.3 不同 O/A 交替时间对污染物的去除特性	42
3.4 污染物去除途径分析	46
3.5 交替曝气系统的硝化效能	52
3.6 污泥特性分析	54
3.7 本章小结	60
4 A—(O/A) ⁿ —SMBR 工艺处理低碳源污水的运行特性	61
4.1 材料与方法	62
4.2 不同 DO 条件下运行效能	63

4.3	NO_2^- 在低氧条件系统中积累效能	68
4.4	NO_2^- 对缺氧吸磷效能的影响	69
4.5	DO 对缺氧吸磷效能的抑制	74
4.6	系统中除磷菌构成	76
4.7	本章小结	79
5	膜污染机理与控制研究	81
5.1	材料与方法	82
5.2	不同工况下的膜污染特性	84
5.3	膜污染控制措施的综合评价	87
5.4	在线化学清洗对出水水质的影响	91
5.5	膜污染形成机理分析	92
5.6	本章小结	97
6	A-(O/A) ⁿ -SMBR 工艺动力学研究	99
6.1	A-(O/A) ⁿ -SMBR 工艺底物去除的化学计量关系	100
6.2	A-(O/A) ⁿ -SMBR 工艺污染物去除动力学	102
6.3	动力学模拟结果的评价	110
6.4	本章小结	113
7	结论与展望	114
7.1	结论	114
7.2	展望	116
附录 1	污泥特性分析	118
附录 2	膜污染特性分析	122
参考文献		124

CHAPTER 1

绪 论

我国是一个水资源十分匮乏的国家,人均水资源占有量为世界人均水平的 1/4,为世界 13 个贫水国家之一。且近年来,随着现代化进程的加快,污染物的大量排放造成水资源水质恶化和水生态系统严重破坏日趋严重,特别是由于来源于城市污水或生活污水中氮和磷营养物质过度排放引起的水体富营养化问题日渐突出。为此,不仅越来越多的国家和地区制定了严格的城市污水氮、磷排放标准,例如,我国 2002 年颁布的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)明确规定了较为严格的磷酸盐、氨氮和总氮的排放标准: $\text{PO}_4^{3-}-\text{P} \leq 0.5 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3-\text{N} \leq 5 \text{ mg/L}$, $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ (一级 A 标准),而且研究和开发经济、高效的污水除磷脱氮也已成为各国环保工作者的研究热点。

1.1 废水生物脱氮除磷的基本原理

目前,可用于废水脱氮除磷的方法包括物理法、化学法以及生物法等。而生物法由于具有高效、低耗以及运行管理操作简单等优点,其作为脱氮除磷的首选工艺受到国内外环保工作者的关注。

1.1.1 生物脱氮机理

生物脱氮原理的生物学过程(图 1-1)可表示为:污水中的含氮有机物首先被异养型微生物转化为氨氮,其次在好氧条件下,通过好氧自养型亚硝化细菌和硝化细菌的作用,将氨氮氧化为亚硝酸盐氮或硝酸盐氮,最后在缺氧条件下,利用反硝化细菌将亚硝酸盐和硝酸盐转化为氮气从污水中逸出,从而达到脱氮的目的。

根据传统生物脱氮理论,生物脱氮包括同化、氨化、硝化和反硝化作用四个过程。

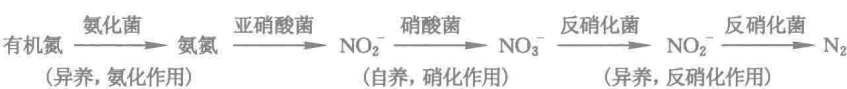


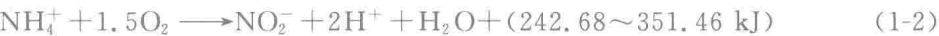
图 1-1 生物脱氮过程示意图

① 同化作用:在生物处理过程中,污水中的一部分氮(氨氮或有机氮)用于合成微生物细胞的组成成分,一般同化作用对氨氮的去除率为 8%~20%。

② 氨化作用:污水中的含氮有机物(蛋白质、核酸、尿素、尿酸、几丁酸质、卵磷脂等)在氨化细菌的作用下,经氧化、还原、水解等转化为氨氮的生物学过程。以氨基酸为例,其反应方程如式(1-1)所示:

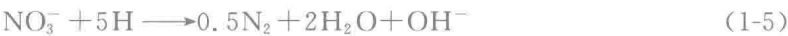


③ 硝化作用:氨氮在有氧条件下被微生物氧化为亚硝酸盐并进一步被氧化为硝酸盐的过程称为硝化过程。进行硝化反应的微生物属于一类好氧自养型微生物,硝化过程经历两个基本生化过程:一是由亚硝化细菌(Nitrosomonas)将氨氮转化为亚硝酸盐;二是由硝化细菌(Nitrobacteria)将亚硝酸盐进一步氧化为硝酸盐。具体的硝化过程可表示为:



根据以上的硝化过程可以发现,在硝化反应过程中,将 1 g $\text{NH}_3\text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 需耗氧 3.43 g,氧化 1 g $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 需耗氧 1.14 g,故氧化 1 g $\text{NH}_3\text{-N}$ 共需消耗 4.57 g 氧气,同时消耗约 7.14 mg 碱度(以 CaCO_3 计)。

④ 反硝化作用:生物反硝化是在缺氧的条件下,微生物以有机物作为电子供体,进行无氧呼吸,将硝化过程中产生的硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体还原成 N_2 的过程。当环境中缺乏有机物时,某些无机盐(如 Na_2S 、 S)也可作为反硝化反应的电子供体,微生物还可以消耗细胞内含物(如 PHB)作为碳源进行反硝化,即所谓的内源反硝化。具体反硝化过程可表示为:



$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 可替代 O_2 作为电子受体使有机物氧化。反硝化过程还会产生碱度,据测定,1 g $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 被还原成 N_2 ,可产生 3.57 g 碱度(以 CaCO_3 计),使硝化作用消耗的碱度有 50% 的补偿。因此,在污水处理中如何巧妙地运用反硝化技术来达到同时去碳(有机物)和脱氮,并最大可能地减少动力消耗和污泥产量,因此反硝化除磷技术成为当前水污染控制工程领域研究的重点方向之一。

1.1.2 生物除磷机理

生物除磷是利用活性污泥中一类兼性厌氧的聚磷菌(PAOs),超量地从污水中摄取

磷,并以聚磷酸盐(poly-P)的形式贮存在自己体内,形成高磷污泥,通过排出剩余污泥达到除磷的目的。生物除磷机理可用图 1-2 所示的生化模型来描述。

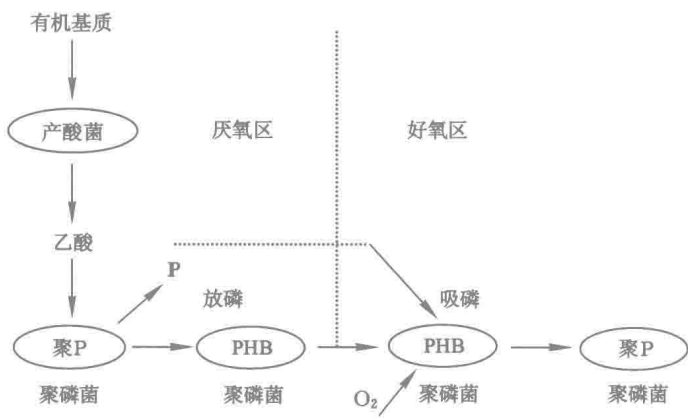


图 1-2 生物除磷机理

生物除磷包括以下几个过程：

- ① 聚磷菌的释磷并合成聚 β 羟基丁酸(PHB)（即厌氧释磷过程）：含聚磷菌的回流污泥和污水一起进入厌氧区,此时污水中有机物在厌氧发酵产酸菌的作用下转化为甲酸、乙酸、丙酸等挥发性脂肪酸(VFAs),而活性污泥中的聚磷菌在厌氧的不利状态下,将体内积聚的聚磷酸盐分解,向污水中转移磷酸盐(释磷过程)。聚磷水解产生的能量一部分供聚磷菌的生命活动需要,另一部分供聚磷菌主动吸收厌氧区产生的或来自原污水的低分子 VFAs,将其转化为有机储备物质并以 PHB 的形态储藏于体内。
- ② 聚磷菌对磷的过剩摄取(即好氧/缺氧吸磷)：进入好氧/缺氧区后,聚磷菌将储藏于体内的 PHB(聚 β 羟基丁酸)进行好氧分解并释出大量能量,能量一部分供聚磷菌增殖,另一部分供聚磷菌主动吸收污水中的磷酸盐,以聚磷酸盐的形式积聚于体内,即“磷的过剩摄取”。
- ③ 剩余污泥排放：聚磷菌通过好氧/缺氧吸磷后,体内聚集的磷浓度远远大于自身磷含量水平,通过排放富磷的剩余污泥,实现磷的去除。

1.2 生物脱氮除磷工艺

按照磷的最终去除方式和构筑物的组成,现有的除磷工艺流程可分为主流除磷工艺和侧流除磷工艺两类。侧流工艺以 Phostrip 工艺为代表,该工艺结合了生物除磷和化学除磷,将部分回流污泥分流到厌氧池放磷并用石灰沉淀,厌氧池不在污水水流的主流方向上,而是在回流污泥的侧流中。主流工艺的厌氧池设在污水的水流主流方向,磷的最终去除是通过排放富磷的剩余污泥来实现的。

1.2.1 侧流脱氮除磷工艺

Phostrip 工艺(图 1-3)是由 Levin 和 Shapiro 在 1965 年提出的一种典型的侧流(side-stream)除磷工艺,其除磷过程是在回流管线中完成的,能较好地克服在同一体系中脱氮除磷对工艺要求不同的矛盾。该工艺的另一个特点是将生物除磷和化学法除磷结合起来,将部分回流污泥分流到专门的厌氧除磷池进行放磷,含磷的上清液再经石灰混凝沉淀处理,最终磷以化学沉淀的形式从系统中排出。

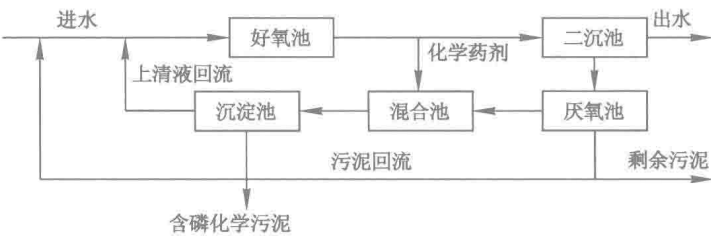


图 1-3 Phostrip 工艺

Phostrip 工艺的厌氧池不在污水主流方向上,而在回流污泥的侧流中,它处理的出水含磷量低($<1\text{ mg/L}$),对进水水质波动的适应性较强,比较适合于对现有工艺的改造,只需在污泥回流管线上增设小规模的处理单元,且在改造过程中不必中断处理系统的正常运行。

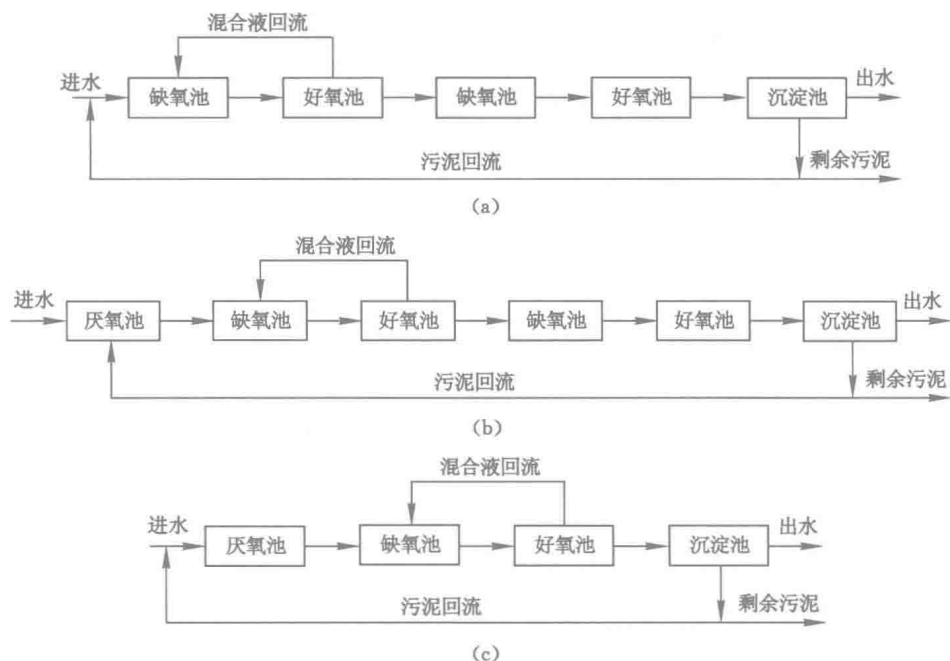
1.2.2 主流脱氮除磷工艺

活性污泥法主流生物脱氮除磷工艺有多种类型,包括 A^2/O 工艺、改良 A^2/O 工艺、UCT 工艺、VIP 工艺、SBR 工艺及 SBR 的各种变形工艺等。

1.2.2.1 A^2/O 工艺

A^2/O 工艺的形成经历以下几个过程:Bardenpho 工艺是在 A/O (anoxic/oxic)脱氮工艺的基础上又增设了一个缺氧池和一个好氧池,又称为四段强化脱氮工艺[图 1-4(a)],该工艺脱氮效果显著,但除磷效果不好。为了提高四段 Bardenpho 工艺的除磷效率,在 Bardenpho 工艺基础上,在第一个缺氧池前增加了一个厌氧池,保证了磷的释放,从而保证了在好氧条件下有更强的吸收磷的能力,提高了除磷的效率,该工艺被称为 Phoredox 工艺[图 1-4(b)]。

将 Phoredox 工艺的第二级缺氧和好氧池取消,构成了新的脱氮除磷工艺,即改良的 Phoredox 工艺,亦称 A^2/O (anaerobic/anoxic/oxic)工艺[图 1-4(c)]。污水进入厌氧池后,兼性厌氧菌将污水中易生物降解有机物转化为挥发性脂肪酸(VFAs),而回流污泥携带的聚磷菌(PAOs)将体内贮存的聚磷水解产能,释放的能量一部分供好氧的聚磷菌在厌氧的环境下的生存需要,另一部分能量供 PAOs 主动吸收 VFAs 并以聚 β 羟基丁酸(PHB)的形式贮存于菌体内。在缺氧池反硝化菌利用混合液回流带入的硝酸盐作为电

图 1-4 A^2/O 工艺的形成(a) Bardenpho 工艺; (b) Phoredox 工艺; (c) A^2/O 工艺

子受体,同时利用进水中的有机物作为电子供体进行反硝化。进入好氧池后,聚磷菌除了吸收利用污水中残留的易降解有机物外,主要分解体内贮存的 PHB 产生能量供自身生长繁殖,并主动过量吸收环境中的溶解性磷酸盐,以聚磷的形式在体内贮积。污水经厌氧、缺氧过程有机物分别被聚磷菌和反硝化菌利用后浓度较低,有利于自养硝化菌的生长繁殖。

1.2.2.2 A^2/O 的改良工艺

为了解决厌氧区硝酸盐的问题及硝化菌与聚磷菌之间泥龄的矛盾,一些学者提出了几种 A^2/O 的改良工艺,主要有以下几种:

(1) 针对硝酸盐问题的改进工艺

在 A^2/O 工艺的厌氧池前设置厌氧/缺氧选择池,10%左右的进水和回流污泥进入该池,回流污泥的硝酸盐被微生物利用部分进水中的有机物反硝化去除,从而消除硝酸盐对释磷的影响,保证厌氧池的厌氧环境,该工艺称为改良 A^2/O 工艺[图 1-5(a)]。

南非开普敦大学开发的 UCT (University of Cape Town) 工艺[图 1-5(b)],将 A^2/O 工艺中的污泥回流至缺氧池,同时增加了从缺氧池至厌氧池的缺氧混合液回流,使污泥经缺氧反硝化后再回流至厌氧池,降低了回流污泥中的硝酸盐浓度。但当进水 TKN/COD 较高时,缺氧池无法实现完全的反硝化脱氮,仍有部分硝酸盐进入厌氧池。后来又提出了改良型 UCT 工艺,即 MUUCT 工艺[图 1-5(c)],将缺氧池分为两段:前一段接收二

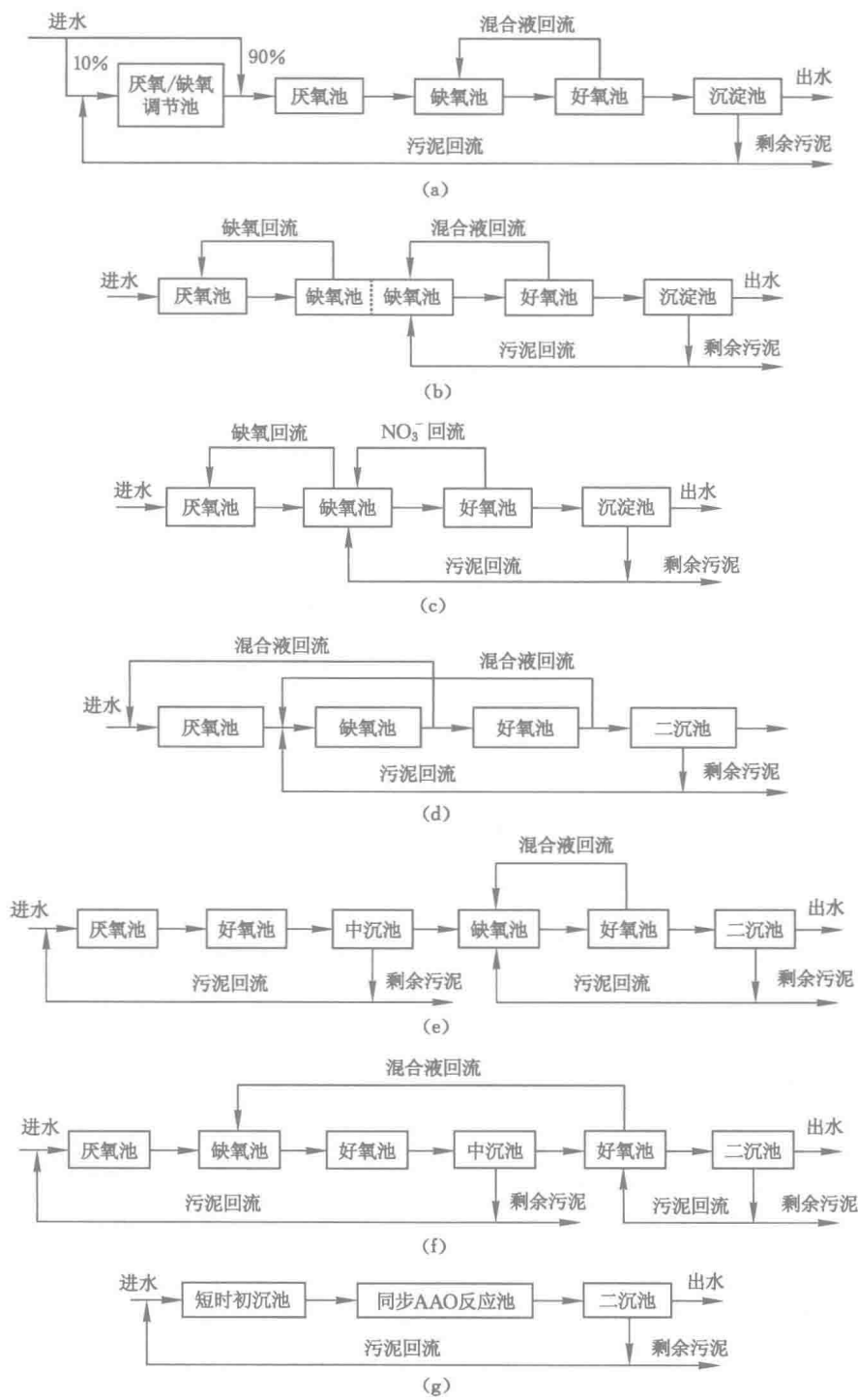


图 1-5 A²/O 的改良工艺

(a) 改良 A²/O 工艺；(b) UCT 工艺；(c) MUCT 工艺；(d) VIP 工艺；
(e) A₁/O—A₂/O 工艺；(f) A₁—A₂/O—O 工艺；(g) 同步 AAO 工艺

沉池的回流污泥,后一段接收好氧池的硝化混合液,从而进一步降低了进入厌氧池的硝酸盐含量。

VIP(Virginia Initiative Plant)工艺[图 1-5(d)]是美国 Randall 教授提出对 UCT 工艺的另一种改良型生物脱氮除磷工艺,其流程和 UCT 类似,但 VIP 在反应器上进行了改进:一方面在于它采用了阶式完全混合式反应器(CSTR)模型进行反应器设计,使厌氧、缺氧和好氧等各生物处理单元由一系列体积较小的完全混合式反应格串联在一起,形成了有机物的梯度分布,有利于发挥聚磷菌的作用,提高厌氧释磷和好氧吸磷速度;另一方面 VIP 工艺的污泥龄比 UCT 工艺短(其设计污泥龄一般为 5~10 d,而 UCT 工艺的污泥龄则为 13~25 d)、负荷比 UCT 工艺高,因而运行速率高,除磷效率高,所需容积小。

(2) 针对泥龄问题的改进工艺

为解决生物脱氮除磷工艺存在的聚磷菌和硝化细菌之间的泥龄矛盾,同济大学高廷耀等在 A/O、 A^2 /O 工艺的基础上开发了具有独立脱氮除磷系统的 A_1 /O— A_2 /O 工艺和 A_1 / A_2 O—O 工艺及同步 AAO 脱氮除磷工艺[图 1-5(e)~图 1-5(g)]。

A_1 /O— A_2 /O 工艺含有两套独立的污泥回流系统,第一级泥龄较短,主要功能是除磷。第二级泥龄较长,主要功能是脱氮,从而避免了硝化菌和聚磷菌在泥龄上的矛盾,但该工艺的第二级容易发生碳源不足的情况,致使脱氮效率大受影响。为此,有学者开发了 A_1 /— A_2 /O—O 工艺,该工艺既解决了泥龄矛盾,又避免了 A_1 /O— A_2 /O 工艺中第二级碳源不足的问题,但工艺趋于复杂。同步 AAO 脱氮除磷新工艺则通过将曝气池中溶解氧控制在较低水平,提高活性污泥颗粒的缺氧、厌氧微生物的比例,并由于微生物的代谢活动和曝气的搅动,使所处缺氧、厌氧、好氧的微环境经常变动,从而促进曝气池中的硝化、反硝化和释磷,吸磷同步发生。

1.2.2.3 倒置 A^2 /O 及改良工艺

倒置 A^2 /O 工艺如图 1-6(a)所示,该工艺具有以下几个特点:聚磷菌经过厌氧释磷后直接进入好氧环境,可更加充分利用其在厌氧条件下形成的吸磷动力,具有“饥饿效应”优势;运行中回流活性污泥全部历经完整的释磷和吸磷过程,故在除磷方面具有“群体效应”优势;缺氧区位于工艺的首端,运行反硝化优先获得碳源,进一步加强了系统的脱氮性能;工程上采取适当措施可以将污泥回流和混合液回流合二为一,因而流程简洁。

倒置 A^2 /O 改良工艺[图 1-6(b)]是天津市政工程设计研究院针对城市污水处理厂除磷的要求较高,而对氨氮的排放标准要求较低,对总氮没有限制的情况提出的。该工艺将 A^2 /O 工艺的污水全部硝化改为部分硝化,不仅可以减少好氧池体积,还可以减少回流污泥中的硝酸盐含量,有利于生物除磷。将全部污水反硝化改为只对回流污泥进行反硝化,回流污泥反硝化的目的只是去除回流污泥的硝酸盐,避免硝酸盐进入厌氧区干扰生物除磷,如此可省去混合液内回流,减小缺氧池体积。

1.2.2.4 SBR 工艺

序批式活性污泥法(Sequencing Batch Reactor, SBR)在 20 世纪 70 年代由美国专家

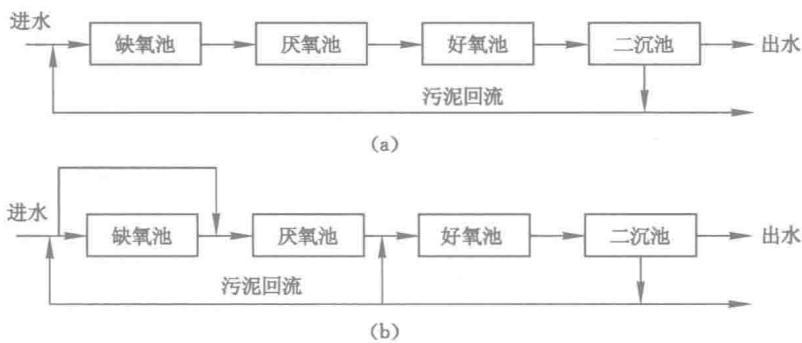


图 1-6 倒置 A²/O 及改良工艺
(a) 倒置 A²/O 工艺; (b) 倒置 A²/O 改良工艺

开发,并很快得到了广泛应用。SBR 由于操作上的灵活性,可以通过限制曝气、半限制曝气,很容易地在一个周期内实现好氧、缺氧和厌氧状态交替的环境条件,为实现脱氮除磷提供了有利的条件。针对传统 SBR 工艺应用的局限性,一些学者对 SBR 工艺进行诸多改进,如 ICEAS 工艺、DAT-IAT 工艺、CASS 工艺、UNITANK 工艺和 SBR 工艺等。这些新工艺将 SBR 同传统活性污泥法相结合,流程简单,布置紧凑,具有良好的脱氮除磷功能。

1.2.2.5 氧化沟(Oxidation Ditch)工艺

氧化沟是 20 世纪 50 年代由荷兰的巴斯维尔(Pasveer)开发的,它属于活性污泥法的一种变形,由于它运行成本低,构造简单,易于维护管理,出水水质好,运行稳定,并可以进行脱氮除磷,因此日益受到人们的重视,并逐步得到广泛应用。氧化沟工艺具有完全混合式和推流式两种反应池的特点,其封闭循环式的反应器构造尤其适用于污水的脱氮除磷,因此在世界各地得到了广发的应用。较常规 A²/O 等工艺,氧化沟工艺省去了污泥回流和混合液回流,节省 10%~20%动力消耗,经改进后的氧化沟工艺总氮去除率可达到 90%上。

1.3 生物脱氮除磷技术的研究进展

随着氮、磷引起的水体污染日趋严重,国内外氮磷排放的标准越来越严格,脱氮除磷成为污水处理领域研究热点方向之一。此外,生物学机理的深入研究和相关学科的发展,也使得生物脱氮除磷技术得以不断地发展和完善。研究人员围绕着生物脱氮除磷系统的微生物种群、氮磷脱除的内在机理和生物脱氮除磷系统的功能强化等问题进行了更深入的研究。近年来,国内外学者在传统的生物脱氮理论上,相继开发出了一些新型的生物脱氮工艺,如同时硝化反硝化、短程硝化反硝化、好氧反硝化、厌氧氨氧化、自养

硝化反硝化工艺等。

1.3.1 同时硝化反硝化

传统生物脱氮理论认为硝化反应在好氧条件下进行,而在厌氧/缺氧环境下完成反硝化,两者不能在同一环境下同时进行。近年来,许多研究者发现硝化和反硝化过程同时发生的现象,尤其是好氧条件下的反硝化现象在不同的生物处理系统中已获得证实,这一发现为简化生物脱氮工艺提供了可能性。

当一个反应器中同时存在好氧环境与缺氧/厌氧环境,硝化和反硝化在同一个反应器内同时发生的生物化学过程称为同时硝化反硝化(Simultaneous Nitrification and Denitrification,简称 SND)。对 SND 工艺来说,由于在同一反应器中同时进行硝化和反硝化反应,硝化产生的 H^+ 可被反硝化产生的 OH^- 迅速中和,减少了 pH 值的波动,使两个生化反应过程同时受益,从而提高反应的效率。且同时硝化反硝化不仅可以发生在生物膜处理过程中(如流化床、生物转盘、曝气生物滤池),也可以发生在活性污泥工艺中的氧化沟及 SBR 等水处理过程。

与传统生物脱氮工艺相比,SND 主要具有以下优点:

- ① 缩短反应时间,节省反应池容积;
- ② 不需要进行酸、碱调节;
- ③ 可明显减少 N_2O 等温室气体的排放。

微环境的存在是引起同时硝化反硝化的直接原因,SND 现象的微环境理论解释模型如图 1-7 所示。微环境理论认为:相对于活性污泥絮体和生物膜厚度来说,微生物的个体形态非常微小,一般属微米级。在活性污泥的絮体中,从絮体表面至其内核的不同层次上,由于氧传递的限制因素,导致氧的浓度分布不均,从而引起微生物群体的活动状态在某种程度上呈现表里不一现象。微生物絮体外表面氧的浓度较高,内层浓度较低。在生物絮体足够大的情况下,可以在活性污泥絮体内部形成缺氧区,在这种情况下,絮体外层好氧硝化菌占优势,主要进行硝化反应,内层为异养反硝化菌占优势,主要进行反硝化反应。除了活性污泥絮体外,一定厚度的生物膜中同样存在溶氧梯度,使得生物膜内层形成微氧缺氧环境。

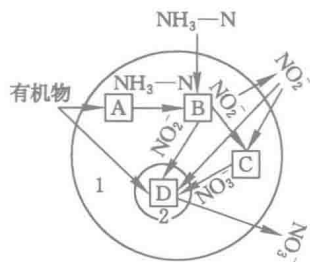


图 1-7 活性污泥中同时硝化反硝化概念模型

A——异养好氧菌;B——亚硝酸菌;
C——硝酸菌;D——反硝化菌;
1——好氧区;2——缺氧区

1.3.2 短程硝化反硝化

传统脱氮理论认为,必须使 NH_4^+ 经过完全硝化和反硝化才能实现废水完全脱氮。而实际上从氮的生物转化过程来看,氮转化为亚硝酸盐和硝酸盐是由两种相对独立的细

菌完成的两个不同的却可以分开的生物反应过程。Vote 在 1975 年就发现在硝化过程中亚硝酸盐的积累现象并首次提出了短程硝化反硝化(SND)生物脱氮理论,其基本原理是在同一个反应器内,首先利用亚硝酸菌在有氧条件下将氨氧化为 NO_2^- (氨氧化过程);然后反硝化细菌在缺氧的条件下,以有机物为电子供体,将亚硝酸盐转化为氮气,即形成 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{HNO}_2 \rightarrow \text{N}_2$ 的脱氮过程。通过 SND 进行脱氮,可节省 25% 的曝气量、40% 的碳源以及 50% 的反应器容积。这些对于高浓度氨氮废水的脱氮处理十分有效,特别是对于一些碳源不足的废水(如垃圾渗滤液等)更是如此。

SND 生物脱氮的关键是将氨氧化过程控制在亚硝化阶段,因此研究如何提高 NO_2^- 的积累、降低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的生成是短程生物脱氮技术的核心所在。许多学者对影响 NO_2^- 积累的因素进行了研究和探讨,归纳起来主要有:泥龄、温度、溶解氧、氮负荷、pH 值和游离态氨、有害物质等。研究表明,pH 值为 7.4~8.3、水温大于 30 °C、游离氨浓度在 0.6 mg/L 以上和低 DO 浓度均有利于短程硝化的发生。

目前根据短程硝化脱氮原理构建的工艺主要有 SHARON(Single reactor system for High activity Ammonia Removal Over Nitrite)工艺和 OLAND(Oxygen Limited Autotrophic Nitrification Denitrification)工艺。

硝化细菌和亚硝化细菌在较高温度(30~35 °C)下生长速度存在显著差异,且亚硝化细菌的最小停留时间小于硝化细菌,荷兰 Delft 大学根据硝化细菌和亚硝化细菌最小停留时间的差别,通过控制系统的水力停留时间,将在高温下生长速度较慢的硝化细菌从反应器中淘汰出去,实现亚硝化细菌在反应器中的积累,即将氨氧化控制在亚硝化阶段,这种工艺称为 SHARON 工艺。1998 年第一个生产规模的 SHARON 工艺已在鹿特丹的 Dokhaven 废水处理厂建成并投入运行。另外,荷兰 Utrecht 市和 Rotterdam 市也有两座污水处理厂应用了 SHARON 工艺。

研究表明,SHARON 工艺好氧/缺氧的运行方式难以保证出水氨氮浓度保持在较低的水平,且 SHARON 工艺只适合于处理含氨氮浓度较高的废水。对于水量较大的城市污水来说,一般属于低温低氨污水,要使大量水升温、保温在 30~35 °C 难以实现。因此,对低温、低氨的城市污水如何实现短程反硝化值得进一步研究。

OLAND(Oxygen Limited Autotrophic Nitrification Dentrification)(氧限制自养硝化/反硝化)工艺是比利时的 Gent 微生物生态实验室研发的。该工艺的核心在于控制 DO 浓度,使氨氧化过程进行到 NO_2^- 阶段。研究表明,低 DO 下亚硝酸菌增殖速度加快,补偿了由于低氧所造成的代谢活动下降,使得整个硝化阶段的氨氧化速度未受到明显影响。

1.3.3 好氧反硝化

生物反硝化最初被认为是一个严格的厌氧过程,由于反硝化菌作为兼性菌优先利用溶解氧进行呼吸,甚至在 DO 浓度低至 0.1 mg/L 时也是如此,因此就阻止了利用亚硝酸