

生物除磷脱氮工艺的探讨

冯生华 姚念民

[提要] 本文结合工程实践,从设计的角度分析了可生化降解有机物、溶解氧、泥龄、流程选择等因素对 A^2/O 工艺除磷脱氮效果的影响,提出了采用回流污泥分流、改进提升、搅拌设备等措施来提高除磷脱氮效果。

以厌氧/缺氧/好氧 (Anaerobic/Anoxic/Oxic, 即 A^2/O) 系统为特征的生物除磷脱氮工艺自被开发以来,就因其特有的经济技术优势和环境效益,越来越受到人们的广泛重视。结合我院的试验研究成果,本文从设计角度对 A^2/O 工艺在实际应用中出现的、问题解决方式以及部分参数的取值做些探讨。为便于分析,先将该工艺的基本原理简述如下:

一、 A^2/O 工艺机理综述

该工艺中碳污染物 (BOD) 的降解过程与传统活性污泥法相同,不再赘述,这里主要谈谈磷和氮的去除机理。

1. 除磷机理

除磷是通过磷的厌氧释放和好氧吸附两个过程完成的。聚磷细胞厌氧释放磷的前提是水中既无分子态氧又无结合态氧 (NO_x^-),在厌氧状态下,聚磷细胞磷的释放越充分,体内贮存的聚 β 羟丁酸也越多,进入好氧状态后磷的吸收量也越大。有试验资料表明,厌氧状态下每释放 1mg 磷,进入好氧状态后就可吸收 2.0~2.4mg 磷。细胞内吸收了磷的高磷污泥最后以剩余污泥的形式排出系统,从而完成除磷过程。

2. 脱氮机理

生物脱氮是由硝化和反硝化两个生化过程完成的,污水先是在好氧池 (Oxic) 中进行硝化,使含氮有机物被细菌分解成氨,氨进一步转化成硝态氮,然后在缺氧池 (Anoxic) 中进行反硝化,硝态氮还原成氮气溢出。

硝化过程分两步进行,在亚硝化菌的作用下,氨先转化为亚硝酸盐氮 ($NO_2^- - N$),然后再

经硝化菌作用,氧化成硝酸盐氮 ($NO_3^- - N$)。上述过程中亚硝化需要的能量为硝化的 3 倍,所以典型的生化处理过程中亚硝酸盐浓度很低,因而硝化速度是由亚硝化速率控制的。

反硝化菌是兼性异养菌,能利用污水中各种有机质作为电子供体,以硝酸盐代替分子氧,作为电子最终受体,进行“无氧”呼吸,使有机质分解,同时将硝酸盐氮还原成气态氮。

脱氮过程为零级反应,反硝化速率与水中硝态氮浓度无关,因此为充分利用水中有有机质,现一般均采用前置缺氧脱氮流程。硝态氮由硝化后的混合液回流提供。

二、试验成果分析

我院在天津和呼和浩特分别进行了 A/O 工艺和 A^2/O 工艺的试验研究,取得的代表性试验数据如下:

1. A/O 工艺在天津的试验结果

试验污水取自天津东郊五个泵站,按各泵站每天排水量的比例调配而成,进水前静沉了 2h,试验流程见图 1,试验结果及运行条件见表 1。

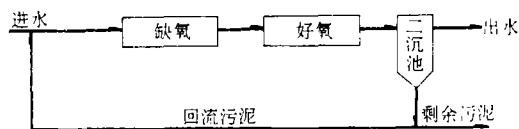


图1 A/O 工艺试验流程

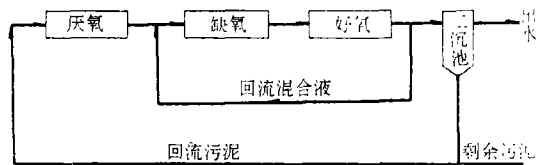


图2 A^2/O 工艺试验流程

A/O 工艺在天津试验结果 表 1

项目	结果	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	运 行 条 件
COD		300	63	76	试验水量 $Q=3.5\text{L/h}$; 停留时间: $A+O=3+6=9\text{h}$; 污泥回流比 300%; 泥龄 20d; 温度 29°C 。
BOD ₅		143	7	94	
NH ₃ -N		20	0.24	98.6	
TN		27.52	5.63	79	
TP		0.59	0.05	92	
SS		93	7.0	91	
SV		19%			
SVI		75			
MLVSS/MLSS		1700/2600			

呼市 A²/O 工艺试验结果 表 2

项目	结果	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	运 行 条 件
COD		199.5	49.7	75	$Q=5\text{L/h}$; 停留时间: $A_1+A_2+O=1+1+4=6\text{h}$; 污泥回流比 $r=60\%$; 混合液回流比 $R=200\%$; 泥龄 20d; 温度 12°C 。
BOD ₅		125.4	4.10	96.6	
NH ₃ -N		20.74	2.117	89.3	
TN		34.32	10.65	68.5	
TP		3.02	1.81	37.4	
SS		167.7	13.38	89.8	
SV		16.5			
SVI		99.8			
MLVSS/MLSS		1310/1650			

2. A²/O 工艺在呼和浩特市的结果

试验污水取自呼市东区污水厂一沉池出水, 试验流程见图 2, 试验结果及运行条件见表 2。

从试验结果可以看出, A/O 工艺和 A²/O 工艺对 COD、BOD 的去除率均很高, 污泥沉降性能良好, 优于普通活性污泥法, 氮也取得了较高的去除率, 而且在大规模试验或实际应用中还能较容易控制厌氧、好氧环境, 回流污泥浓度等, 因此如能较好的控制运行条件, 是能够取得更高的脱氮效果的。

在天津进行的 A/O 工艺运行中, 虽也取得了很高的磷去除率, 经分析认为那是由于进水不富磷(仅为 0.59mg/L)造成的, 它的去除是由于微生物维持生命活动合成细胞质而致, 与本文探讨 A²/O 工艺中的“通过厌氧-好氧过程使磷过量吸附”的去除机制无关。

在呼市进行的几个阶段 A²/O 试验中磷去除率均不很高, 其原因我们将在后面讨论。

三、问题的探讨

给水排水 1994 No. 2

1. 可生化降解有机物对除磷脱氮的影响

按基质的性质, 混合液中可生化降解有机物有以下三类: 第一类为快速生物降解的溶解性有机物, 如甲醇、乙酸、葡萄糖等; 第二类是慢速生物降解的有机物, 如淀粉等颗粒型高分子有机物; 第三类则是微生物细胞物质的自身氧化, 即内源呼吸。其中第一类基质对生物除磷脱氮影响最大, 厌氧池的聚磷菌释放磷酸盐过程中用以维持生命而吸收入细胞内并转化成聚 β 羟丁酸的有机物均为此类基质, 有资料介绍表明厌氧池中聚磷菌吸收的该类有机物将占进水有机物的 20% 左右。这样虽然使液相中有机物浓度下降, 但该部分有机物仍需好在好氧区增殖、吸附磷过程中氧化, 所以对整个系统而言除磷过程不影响氧量平衡。

另外, 第一类基质进入缺氧区作为供氢体时, 反硝化速率 K_{dn1} 值也比第二类基质和第三类基质大一个数量级。据测定三类基质的 K_{dn} 值分别为:

$$K_{dn1}(20^{\circ}\text{C})=0.0318\text{mgNO}_3^- - \text{N}/\text{mgVSS}$$

$$K_{dn2}(20^{\circ}\text{C})=0.0045\text{mgNO}_3^- - \text{N}/\text{mgVSS}$$

$$K_{dn3}(20^{\circ}\text{C})=0.0032\text{mgNO}_3^- - \text{N}/\text{mgVSS}$$

可见内源呼吸的反硝化速率仅为第一类基质的 10%, 如果原水中的 BOD 浓度较高, 有充分的快速生化降解有机物时(即碳氮比较高), 其反硝化可以仅利用第一类基质, 从而就可使脱氮池建得很小, 使水力停留时间(HRT)为 $0.5\sim 1.0\text{h}$ 即可, 如果进水 BOD 较低时, 则脱氮过程就不可能完全利用此类基质, 欲保持较高的脱氮效率, 就要消耗第二类基质, 这样缺氧池的水力停留时间就应达到 $2\sim 3\text{h}$ 。

由有机物水解方程式得出, 转化 1mg/L $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 大约需要 3mg/L BOD₅, 而对无除磷要求的 A/O 工艺, 如要维持较高的反硝化速率, 设计可按有 $1/3$ 的 BOD₅ 在缺氧池中被氧化考虑。

由此可见水中的碳氮比对除磷脱氮效果至关重要, 对于低 BOD₅ 浓度的城市污水, 当碳氮比较低时, 得到过高脱氮率是不现实的, 日本的桥本奖提出进水 $\text{COD}/\text{TKN}>8$ 时, 总氮

去除率可达 80%，随着 COD/TKN 降低，氮的去除率明显下降。

2. 各区溶解氧(DO)对 A²/O 工艺的影响

①好氧区：Monod 方程指出了硝化菌生长速率与溶解氧有如下关系：

$$\mu_n = (\mu_n)_{\max} \left[\frac{O_2}{K_{O_2} + O_2} \right]$$

式中 O₂ 为溶解氧浓度；K_{O₂} 为氧的半速率常数，美国环保局(EPA)推荐使用 K_{O₂} 为 1.3mg/L，因此推算好氧区的 DO 应在 2mg/L 以上。

但对 A²/O 工艺也不是 DO 越高越好，因为好氧区 DO 过高则溶解氧会随回流带至厌氧区、缺氧区，造成厌氧不完全，影响磷的释放和反硝化。另外，据资料介绍，1980 年水研究论文集中，查列等在论文《不同温度下活性污泥硝化动力学与溶解氧浓度》中还提出了“高浓度溶解氧也抑制硝化菌”的观点，因而建议好氧区溶解氧应在大于 2mg/L 的条件下偏低为宜。

②厌氧区和缺氧区：从机理分析可知磷的释放和反硝化均需溶解氧越低越好，为零时最佳，如无法保证，应确保厌氧区 DO<0.2mg/L；缺氧区 DO<0.5mg/L。

3. 污泥泥龄(SRT)对去除磷氮的影响

A²/O 工艺系统的泥龄主要受硝化菌世代时间影响，应较普通活性污泥法长些，而由机理分析可知这一过程又主要取决于亚硝化菌的生长速率，故泥龄计算也应应以亚硝化菌生长速率为依据。但由于磷的去除主要通过剩余污泥排出系统，故 A²/O 工艺中泥龄又不宜过长，一般推荐泥龄在 10~30d 之间，我院的几次试验研究中均确定泥龄为 20d，所做的实际工程泥龄选用也均在 15~20d 之间。

参考国内外资料，也可分别根据下列公式之一计算最短泥龄：

(1) $SRT = 3.05(1.127)^{20-T}$ (英国经验公式，英国 HAWKER SIDDELEY WATER ENGINEERING LTD. 提供)

$$(2) SRT = \frac{TKN_{TE} + 1.5}{TKN_{TE}} \times \frac{1 + 1.094^{15-T}}{0.126} \quad (\text{法}$$

国经验公式，式中 TKN_{TE} 为出水 TKN)

(3) $K_n = 0.18e^{0.12(T-15)}$ ； $SRT = \frac{1}{K_n}$ (瑞典经验公式，瑞典 ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY AB 提供)

$$(4) U_n = [0.47e^{0.098(T-15)}] \cdot \left[\frac{N}{N + 10^{0.051T-1.158}} \right] \cdot \left[\frac{O_2}{K_{O_2} + O_2} \right] \cdot [1 - 0.833(7.2 - pH)]$$

$SRT = (2 \sim 3) \times 1/U_n$ (一般常用计算公式，《给水排水设计手册》第五册)

如取设计最低温度为 10℃，进水 TKN 为 40mg/L，TKN_{TE} = 10mg/L，硝化池中 N = 20mg/L，pH = 7.2，好氧区 K_{O₂} = 1.3mg/L，O₂ = 2mg/L，进行验算，用四种公式计算 SRT 结果分别为 10.1d、14.3d、17.2d、(12~17.4d)。

4. 流程选择对实际工程中磷氮去除的影响及改进的建议

目前我国一些以 A²/O 工艺运行的污水处理厂中普遍存在着以下现象：当脱氮效果好时除磷效果较差(我院在呼市的 A²/O 试验也明显的出现了类似现象)，而当除磷效果较好时脱氮效果又不佳。可以认为这与目前所选用的流程本身不够完善有关，受“厌氧”和硝化程度影响所致。

国内以 A²/O 方式运行的污水厂的流程均如图 2 所示，其回流污泥全部经厌氧区进入系统，而为使系统维持较低的污泥负荷运转，确保硝化过程的完成，一般所采用的回流比均较大，通常为进水量的 60~100%，最低也在 40% 以上。这样当系统硝化作用良好时，随回流污泥将硝酸盐大量带到厌氧池。而除磷机理表明，磷必须在混合液中存在可快速生物降解有机物且既无分子态氧又无结合态氧的环境中才能厌氧释放，当水中存在硝酸盐时，则系统首先消耗可快速生化降解的有机物进行反硝化，脱氮完全后才能开始磷的厌氧释放过程，这就使得厌氧区实际可利用基质和有效容积都大为减少，最终表现为虽加强了脱氮效果，却使得系统除磷效果下降。反之，如硝化作用不好，则随回流污泥进入厌氧区的硝酸盐减少，相应改善厌氧环境，使磷能充分地厌氧释放，进而提高系

给水排水 1994 No. 2

统的磷去除率,而硝化不完全表现出来的即为脱氮效果不佳。

此外,对于除磷和脱氮均有不利影响的,还有厌氧区和缺氧区溶解氧过量问题,经分析主要是由以下原因造成的:

①目前污水处理厂普遍使用螺旋泵提升回流污泥,该设备在提升过程中必然会产生“表曝”现象,使回流污泥中带有大量分子氧。

②进水和回流污泥进入厌氧池时产生跌落也将带进空气。

③厌氧区、缺氧区搅拌功率较大时产生的涡流现象也将使混合液溶解氧升高。

经研究认为在呼市的 A^2/O 工艺试验中除磷效果较差的主要原因就是由于回流污泥中带入了大量的硝酸盐和溶解氧。

据此,建议在今后的 A^2/O 工艺设计和应用中采取如下措施改善运行条件:

①、建议采用如图3流程,将回流污泥分两点加入系统,减少到厌氧池的回流污泥量,以此减少进到厌氧池的硝酸盐和溶解氧。一般到厌氧池的回流污泥为进水量的10%左右即可满足除磷需要,有条件时回流量的大小还可通过试验确定。其余的回流污泥则可回流到缺氧区以保证脱氮需要。

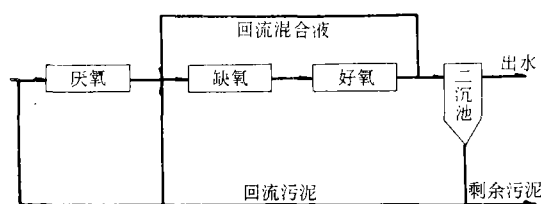


图3 A^2/O 工艺推荐流程

②以复氧较少的提升设备(如潜污泵)替代螺旋泵,如无合适设备替代时,应尽量使回流污泥泵房远离缺氧池,以便有时间使溶入的氧得以溢出或在传输过程中消耗掉。

③用于厌氧区、缺氧区的水下搅拌器功率不可过大,一般有 $2.5\sim 3W/m^3$ 的搅拌功率就可使污泥不致发生沉淀。

给水排水 1994 No. 2

④原污水及回流污泥进入厌氧池缺氧池时应为淹没出流,减少复氧。

对于低浓度的城市污水,如采用 A^2/O 工艺运行,建议应取消初沉池,使原污水沉砂后直接引入厌氧池,以免使原污水中碳氮比进一步下降造成缺乏碳源。这是因为一般污水中含有一定数量颗粒状碳有机物,而含氮有机物多为溶解性的。我院在呼市进行 A^2/O 工艺小试时曾两次分别测定该市东区污水厂的一泵房和一沉池出水水质,也证实了这点。测定结果一泵房出水的 COD/TP 为68.97, COD/TN 为6.23;一沉池出水的 COD/TP 为59.04, COD/TN 为5.85。

5. 污泥产率及其后处理对除磷效果的影响

A^2/O 工艺中污泥产率与泥龄有密切关系,泥龄越长产泥率越低,其范围在0.7~0.4之间。对应泥龄15~20d,产泥率约在0.6~0.55之间。由于 A^2/O 工艺系统中剩余污泥含磷量高于普通活性污泥法,因此在其浓缩消化过程中会有磷的重新释放和溶出(二沉池中如存在死角或积泥时间过长也会有此现象),据美国空气产品和化学品公司的试验观察,污泥消化后磷的溶出量可达进水负荷的20%左右,所以污泥如采用上述工艺处理,其上清液回到进水井之前必须投加混凝剂除磷。因而鉴于 A^2/O 工艺的活性污泥一般较稳定,沉淀性能较好,含磷丰富,其完全可以不经消化,浓缩压饼后作绿化肥料或农肥使用。

综上所述, A^2/O 工艺在去除水中碳污染(BOD)的同时,能有效的去除污水中氮和磷的污染。具有更佳的环境效益,并为污水回用和资源化开辟了新的途径,与普通二级处理后再进行三级物化处理相比不仅投资和运行成本低廉,并且无大量难以处理的化学污泥,因而开发应用前景看好。但该工艺在工程实践上目前还缺乏成熟的设计理论及运行管理经验,有待于今后加强开发,以便使之能全面推广和应用。

△作者通讯处:300051 天津市营口道 239 号

天津市市政工程勘测设计院

STUDY ON BIOLOGICAL TECHNOLOGY TO REMOVE N AND P *Feng Shenghua et. al* (18)

Abstract: The effects of biodegradable organic compounds and dissolved oxygen contents, activated sludge age and treatment process on the N and P removal of A²/O technology are analysed from the view of design with engineering practice. The measurements to improve the efficiency of denitrification and dephosphoration are developed including diversion of returned sludge and upgrading of sludge lifting and mixing equipment.

PRESENT STATUS OF URBAN WASTEWATER TREATMENT IN GERMANY *Tang Jianguo* (22)

Abstract: The treatment technology, constitution of raw wastewater, water quality norm, principles of polluter pays, denitrification and dephosphorus, waste water filtration and sludge disposal in Germany are summarized in this paper.

PRESENTATION ON DESIGN OF WASTEWATER TREATMENT PLANT IN XIANYANG AIRPORT

..... *Chen Guangyao* (25)

Abstract: The capacity of wastewater treatment plant of Xianyang Airport in Shaanxi province was designed as 3250 and 6500 cubic meters per day for recent and final stages respectively. Integrated oxidation ditch and boat type clarifier with directly recycling of activated sludge through the corridors under the bottom of the tank were adopted. The design parameters and facility arrangement are presented in the sequence of treatment flow and some proposals for improvement indicated in this paper.

BRIEF INTRODUCTION OF INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT OF XUZHOU GENERAL

SYNTHETIC DETERGENT PLANT *Wei Bangsen* (28)

Abstract: The industrial wastewater of Xuzhou general synthetic detergent plant was treated by foam-separating-vacuum foam distinction and filtration technique with capacity 1000 cubic meters per day. Results of two years operation show that the selected treatment technology is suitable to treat wastewater contained high concentration of detergent (LAS) with advantages of low investment and operation expenses and stable performance. 90% of the treated wastewater is reused for detergent production. The quality of discharged effluent is better than the requirement of the national standard of wastewater discharge.

NORM ON WATER SUPPLY AND SEWAGE WORKS OF SMALL RESIDENTIAL QUARTERS

..... *Zhou Hucheng* (30)

Abstract: The approval of the first Norm on Water Supply and Sewage Works of Small Residential Quarters in our country has been accomplished by the Building Water Supply and Drainage Council of China Engineering Construction Standardization Association. Some questions which are every one concerned such as the suitable range of this norm, the designed water demand, water distribution network and its arrangement, designed flowrate of water supply