

溶解氧浓度对 A^2/O 工艺运行的影响

吴昌永^{1,2}, 彭永臻^{1,3}, 王然登¹, 李晓玲¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 中国环境科学研究院 水污染控制技术研究中心, 北京 100012; 3. 北京工业大学
北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要: 以城市污水厂中最常采用的 A^2/O 工艺为研究对象, 开展了处理实际生活污水的研究, 系统探讨了 DO 浓度对该工艺运行的影响。结果表明, 当好氧区的 DO 平均浓度从 4.0 mg/L 降低至 1.0 mg/L 时, 对 COD 的去除基本不受影响; 而系统的硝化效果逐渐降低, 但是低 DO 浓度引发的 SND 等作用, 使得对 TN 的去除率反而逐渐升高。单纯从生物脱氮的角度考虑, A^2/O 工艺可以在 DO 为 1.0~2.0 mg/L 之间运行。不过低 DO 浓度运行对生物除磷效果的影响很大, 在 DO 为 1.0 mg/L 时, 除磷效率逐渐下降, 这是由于供氧不足引发了生物除磷性能的恶性循环。另外, 低 DO 浓度运行还引发系统中的污泥发生了微膨胀现象, 在污泥微膨胀期间出水 SS < 5 mg/L。就总体的运行情况而言, 不同于 A/O 等单纯脱氮工艺, A^2/O 工艺不宜在 DO < 2.0 mg/L 的条件下运行, 否则需要引入化学除磷。

关键词: A^2/O 工艺; 溶解氧; 脱氮除磷; 污泥膨胀

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2012)03-0005-05

Effect of Dissolved Oxygen Concentration on Performance of A^2/O Process

WU Chang-yong^{1,2}, PENG Yong-zhen^{1,3}, WANG Ran-deng¹, LI Xiao-ling¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Research Center of Water Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: As a conventional process used in WWTP, A^2/O process was used to treat actual domestic sewage to investigate the effect of DO on the performance of this process. The results showed that when the average DO concentration in aerobic zone was decreased from 4.0 mg/L to 1.0 mg/L, the removal of COD was not affected basically. However, the nitrification effect was decreased with the decrease of DO. Simultaneous nitrification and denitrification (SND) was enhanced with the decrease of DO, and the TN removal efficiency was increased correspondingly. Considering the nitrogen removal, the DO concentration could be kept between 1.0 and 2.0 mg/L. The removal of phosphorus was drastically affected by the decrease of DO. When the DO concentration was 1.0 mg/L, the removal efficiency of phosphorus is decreased by deterioration of phosphorus removal performance caused by insufficient oxygen

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2009BAC57B01)

supply. The limited sludge bulking was caused by the low DO concentration, and the effluent SS was lower than 5 mg/L during this period. It is recommended that the DO concentration in the A^2/O process should be kept higher than 2.0 mg/L during the operation. Or else, chemical phosphorus precipitation should be introduced.

Key words: A^2/O process; dissolved oxygen; nitrogen and phosphorus removal; sludge bulking

生物反应单元的 DO 控制是污水处理厂运行中至为重要的环节,该参数控制效果的好坏直接关系到出水水质和污水厂运行能耗的高低。一般来说污水处理厂 DO 控制的目标是:确保供氧量满足生物处理单元动态变化的 O_2 需要并维持一个期望的混合液 DO 浓度,在此基础上最大程度地减小曝气能耗。结合 A^2/O 工艺的实际特点来分析,生物反应单元中的 DO 不足将抑制微生物活性,从而影响碳氧化、硝化及吸磷作用。相反,过度曝气会造成能量的浪费,同时也不利于生物除磷^[1,2]。

在污水生物脱氮处理单元中,DO 又是实现短程硝化反硝化的一个至为重要的控制条件。Ma 等人采用中试规模的 A/O 生物脱氮工艺处理实际污水,通过控制好氧区的 DO 在 0.4 ~ 0.7 mg/L 之间而成功实现了短程硝化反硝化,其好氧末期的亚硝酸盐积累率在 95% 左右。和全程脱氮相比,短程生物脱氮节省了 24% 的曝气量,同时对 TN 的去除率还提高了近 20%^[3]。由此可见,既能提高对污染物的去除率,又能节省曝气能耗的低 DO 浓度运行方式无疑是十分诱人的。

基于此,考察了 DO 浓度对 A^2/O 工艺处理效果的综合影响,同时对不同 DO 浓度下的生物脱氮除磷现象进行了分析,以期对 A^2/O 工艺维持适当的 DO 水平运行提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

A^2/O 装置用有机玻璃制成,由合建式厌氧/缺氧/好氧反应器和二沉池组成^[4]。合建式反应器有效容积为 52.5 L,分为 9 个格室,前 2 个格室为厌氧区,随后的 2 个为缺氧区,剩下的 5 个为好氧区。厌氧区、缺氧区和好氧区的体积比为 1 : 1 : 2。厌氧和缺氧区采用搅拌混合,好氧区通过固定在底端的曝气头供氧同时促进液体混合。反应器内温度通过加热棒控制在 21 ~ 22 °C。二沉池的有效容积为 26 L。

进水、污泥及硝化液回流均采用蠕动泵控制。运行条件如下:进水量为 157.5 L/d,反应区的 HRT 为 8 h, SRT 通过排泥控制在 15 d 左右,反应器中 MLSS 平均为 3 500 mg/L 左右,污泥回流比为 70%,内循环回流比为 250%。试验过程中好氧区的曝气量通过气体流量计进行控制。接种污泥取自哈尔滨市某污水处理厂,该厂的除磷效果较好。试验启动用了 20 d,好氧区的平均 DO 浓度接近 4.0 mg/L。启动稳定后共运行 120 d,期间控制好氧区的 DO 平均浓度分别约为 4.0、3.0、2.0 和 1.0 mg/L,每种 DO 浓度下各运行 30 d。

1.2 原水水质

生活污水取自哈尔滨工业大学二校区的教工生活区。由于试验过程中逐渐转为夏季,该污水中的磷浓度偏低,因此向其中投加 KH_2PO_4 使 $PO_4^{3-}-P$ 平均浓度维持在 7.47 mg/L 左右。原水的 COD 和 NH_4^+-N 平均浓度分别为 299.2 和 44.9 mg/L。

1.3 测试项目与方法

总碱度、COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN、 $PO_4^{3-}-P$ 、MLSS 等均采用国家标准方法测定,水样在测定前先经定量滤纸过滤;DO 采用在线仪测定;污泥中 PHA 的测定参照文献[5]。

2 结果与分析

2.1 DO 对去除 COD 的影响

试验结果表明,污泥在接种初期即拥有较强的去除 COD 能力,而且在不同的 DO 浓度下,对 COD 的去除效果基本不受影响,系统保持了较为稳定的去除 COD 能力。在平均进水 COD 为 299.2 mg/L 的情况下,出水 COD 平均为 46.1 mg/L,平均去除率为 84.6%。因此,单纯从去除 COD 的角度来讲,好氧区中 DO 为 4.0 mg/L 和 1.0 mg/L 时几乎没有差别,但从节省曝气能耗的角度考虑的话,该 A^2/O 系统可以采用相对较低的曝气量。

2.2 DO 对生物脱氮的影响

在生物脱氮过程中,DO 对氮的去除效果有重

要的影响,因为硝化过程需要严格的好氧条件,若系统供氧不足,则硝化难以完成,高效脱氮更无法实现。在系统启动初期,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果并不好,这是因为刚接种的污泥中硝化细菌的数量并不多,且作为化能自养菌的硝化细菌生长缓慢。在刚启动时,进出水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度分别为 43.71 mg/L 和 17.99 mg/L,表明硝化过程并没有完成,尽管好氧区的平均 DO 浓度高达 4.0 mg/L。随着系统的运行,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除情况逐渐好转,在第 17 天时,进出水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度分别为 49.10 mg/L 和 0.95 mg/L,此后系统的硝化效果一直维持在较好的水平。

图 1 是在不同 DO 条件下对 TN 的去除情况。总体来看,随着 DO 浓度的逐渐降低,对 TN 的去除率呈升高的趋势,在 4.0、3.0、2.0、1.0 mg/L 这 4 种 DO 条件下,对 TN 的平均去除率分别为 73.8%、77.8%、79.3% 和 81.2%。这是因为在好氧区的 DO 浓度较高的情况下,回流至缺氧区的硝化液中的 DO 浓度也较高,造成了缺氧环境的破坏,导致缺氧区的反硝化效率下降。而当好氧区的 DO 浓度偏低时,回流的硝化液中携带的 DO 对缺氧区的影响较小,这对缺氧环境的破坏及反硝化效果的影响相对较小。另外,在好氧区 DO 浓度较低的情况下系统中所出现的同步硝化反硝化(SND)现象也能提高对 TN 的去除率。因此在 DO 浓度降低至 1.0 mg/L 时,对 TN 的去除率反而高达 81.2%。

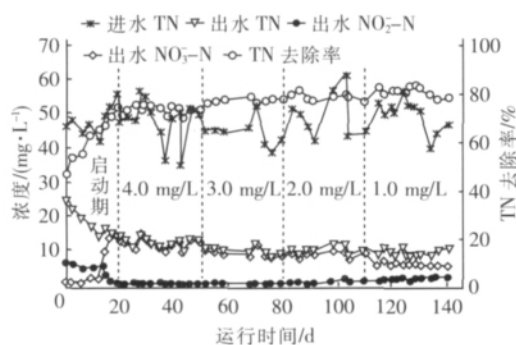


图 1 不同 DO 浓度下对 TN 的去除效果

Fig. 1 Removal of TN under different DO levels

基于物料平衡对本系统中不同 DO 条件下氮的去向进行了研究,结果发现不同的 DO 条件下氮的去除途径有较大差异。当 DO 浓度较高时(如 DO = 4.0 mg/L),反硝化掉的氮能占到 42.95%,SND 去除的氮只占 3.53%;而当 DO 浓度较低时(如 DO =

1.0 mg/L),SND 去除的氮占到 27.78%,而由反硝化去除的氮减少到 18.09%。由此可知,在较低的 DO 浓度下 SND 的作用会显著上升。采用文献[6]中的方法计算不同 DO 条件下系统的 SND 率,在 DO 为 4.0、3.0、2.0 和 1.0 mg/L 时,平均 SND 率分别为 13%、25%、53% 和 63%。因此,在好氧区的平均 DO 浓度较低时,经 SND 方式脱氮的比例会增加,即控制好氧区较低的 DO 浓度对脱氮过程具有一定的优化作用。但是,随着 DO 浓度的降低,氨氮的硝化受到的影响会逐渐变大,相应的出水 TN 中氨氮所占的比例也越来越大,从而制约了 SND 对脱氮的贡献。综合来看,若在保证 A²/O 系统有较高的脱氮效率,最好控制好氧区的平均 DO 值在 1.0 ~ 2.0 mg/L 之间,在这个范围内,偏低的 DO 值有利于提高系统的脱氮效率。

2.3 DO 对生物除磷的影响

图 2 是在不同 DO 浓度下对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除情况。由于接种污泥的除磷性能良好,因此系统一经启动,除磷效果就非常好,在启动的前 20 d 里,平均进水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为 7.38 mg/L,平均出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为 0.30 mg/L,去除率高达 95.97%。此外,在 DO ≥ 1.0 mg/L 时,系统一直维持较高的生物除磷活性,不过随着 DO 浓度的逐渐降低,出水的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度有增加的趋势,在 DO 为 4.0、3.0 和 2.0 mg/L 时,出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 分别为 0.21、0.28 和 0.50 mg/L;而当好氧区的平均 DO 降至 1.0 mg/L 时,系统的除磷效果恶化,出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均为 3.12 mg/L。因此,从控制出水磷浓度的角度考虑,A²/O 工艺中好氧段的平均 DO 值不宜低于 2.0 mg/L。

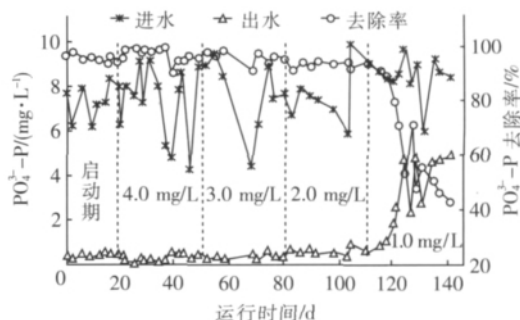


图 2 不同 DO 条件下对磷的去除效果

Fig. 2 Removal of phosphorus under different DO levels

为了分析好氧区的平均 DO 为 1.0 mg/L 时的除磷状况,选择第 136 天的数据进行分析,具体见图

3. 可以看出,虽然出水的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度较高 (2.65 mg/L),但还是表现出了典型的生物除磷特性:在厌氧末端,系统释磷后的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为53.45 mg/L,同时有 PHA 的积累;在缺氧段和好氧段, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度逐渐降低,同时伴随着 PHA 的消耗。在好氧末端,污泥中的 PHA 含量还高达51.35 mg/L。有研究表明,当生物除磷污水厂的好氧区过度曝气或者由于雨天造成进水的有机负荷太低时,在好氧段胞内聚合物(如 PHA 和糖原等)会过度消耗,导致后续释磷动力不足,从而造成除磷效率的恶化^[2]。从本研究来看,由于好氧末端污泥中 PHA 的含量还很高,因此,可推测是由于好氧区的供氧不足,导致 PHA 的氧化不完全,产生的能量不足以完全吸收水中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$,使得最终出水的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度较高。当该好氧吸磷能力受到影响时,聚磷菌体内储存的聚磷酸盐量就偏低,由于从好氧区回流至厌氧区的污泥中微生物体内聚磷酸盐的水解是厌氧吸收 VFA 并合成 PHA 的能量来源,这就使得厌氧段的释磷量和 PHA 的储存量偏低,从而造成后续好氧段过量吸磷的能量来源不足,好氧吸磷的效率较低,出水中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度较高。由于生物除磷需要在厌氧、好氧状态间来回转化,因此 DO 不足会造成生物除磷性能持续下降。所以,从本研究来看,若保持好氧段的平均 DO 值在 1.0 mg/L 左右,必须辅以化学除磷,否则为保证生物脱氮除磷的效果,好氧区的平均 DO 值至少应为 2.0 mg/L。

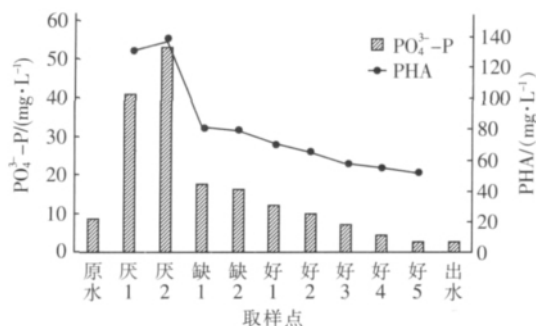


图3 反应器在第136天的运行结果

Fig. 3 Variations of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and PHA on 136th day

2.4 DO 对污泥沉降性能的影响

低 DO 浓度是引起污水厂中活性污泥膨胀的重要因素之一^[7]。由于系统采用由高到低的 DO 浓度运行方式,势必会对污泥的沉降性能造成影响。图4是在不同 DO 浓度下 SVI 和出水 SS 值的变化情

况。可以看出,随着好氧区平均 DO 浓度的降低,污泥的沉降性能逐渐变差,在好氧区平均 DO 为 4.0、3.0、2.0 和 1.0 mg/L 时,污泥的 SVI 平均值分别为 91.8、118.8、156.4 和 184.5 mL/g。镜检也可发现污泥中存在大量的丝状菌。根据传统的判定污泥膨胀的标准,在 DO 为 2.0 mg/L 时系统就已处于污泥膨胀状态^[7]。

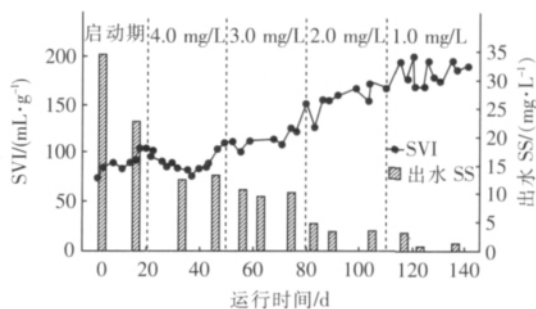


图4 不同 DO 浓度下 SVI 和出水 SS 值的变化

Fig. 4 Variations of SVI and effluent SS under different DO levels

参照课题组前期的研究成果^[8],此时系统中的污泥处于微膨胀状态,即污泥并未呈现严重膨胀甚至达到无法控制的持续膨胀恶化状态,而是在运行条件固定时,SVI 值最终会保持在一个相对稳定的范围内。从本研究来看,在低 DO 浓度下运行引发的丝状菌污泥微膨胀期间,出水非常清澈。试验期间进水 SS 为 120~250 mg/L,当 DO 浓度高、污泥沉降性能良好时,出水 SS 为 12.5~22.7 mg/L;而在丝状菌污泥微膨胀期间,出水明显变得清澈,SS 在 5 mg/L 以下。具体来看,在 DO 为 4.0、3.0、2.0 和 1.0 mg/L 时,出水 SS 的平均值分别为 20.8、10.2、3.9 和 1.8 mg/L,这是由于丝状菌占一定比例的微膨胀污泥能够通过架桥作用形成污泥层,从而在沉降过程中有效地捕捉出水中的微小悬浮物,使得出水非常清澈。

3 结论

① 在好氧区的平均 DO 值从 4.0 mg/L 降低至 1.0 mg/L 的过程中, A^2/O 系统对 COD 的去除没有受到明显的影响,去除率一直维持在较高的水平,平均为 84.6%。

② A^2/O 系统中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的硝化会受到好氧区 DO 浓度的影响,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度随着 DO 浓度的降低而逐渐增加,而对 TN 的去除率随着 DO 浓度的降低而逐渐升高,这是由于经 SND 方式去除的

TN 的比例增加所引起的。从实现生物脱氮的角度来看, 维持 A²/O 工艺中好氧区的 DO 为 1.0 ~ 2.0 mg/L 较为合适, 在此范围内 DO 浓度越低越利于对总氮的去除。

③ DO 浓度对生物除磷有显著的影响。在 DO 不低于 1.0 mg/L 时, 系统一直维持较高的生物除磷活性, 但随着 DO 浓度的逐渐降低, 出水的 PO₄³⁻ - P 浓度有增加的趋势。而当 DO 为 1.0 mg/L 时, 系统的除磷性能逐渐恶化。从本研究来看, 若维持好氧区的低 DO 浓度运行, 则 A²/O 工艺须辅以化学除磷, 否则好氧区的平均 DO 不宜低于 2.0 mg/L。

④ DO 对 A²/O 系统中活性污泥的沉降性能有一定影响。随着好氧区平均 DO 浓度的降低, 污泥的沉降性能逐渐变差, 当 DO 浓度偏低时, 系统中的污泥处于微膨胀状态, 但其中的丝状菌具有一定的拦截捕捉作用, 使得出水 SS < 5 mg/L。

参考文献:

- [1] 王晓莲, 王淑莹, 马勇, 等. A²O 工艺中反硝化除磷及过量曝气对生物除磷的影响[J]. 化工学报, 2005, 56(8): 1565 - 1570.
- [2] Brdjanovic D, Slamet A, van Loosdrecht M C M, et al. Impact of excessive aeration on biological phosphorus removal from wastewater[J]. Water Res, 1998, 34(1): 200

- 208.

- [3] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant[J]. Water Res, 2009, 43(3): 563 - 572.
- [4] 吴昌永, 彭永臻, 彭轶. A²/O 工艺的反硝化除磷特性研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(15): 11 - 14.
- [5] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Enhanced biological phosphorus removal by granular sludge: from macro- to micro-scale[J]. Water Res, 2010, 44(3): 807 - 814.
- [6] Munch E V, Lant P A, Keiler J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors[J]. Water Res, 1996, 30(2): 277 - 284.
- [7] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, et al. Filamentous bulking sludge—a critical review[J]. Water Res, 2004, 38(4): 793 - 817.
- [8] Guo J H, Peng Y Z, Peng C Y, et al. Energy saving achieved by limited filamentous bulking sludge under low dissolved oxygen[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(4): 1120 - 1126.

作者简介: 吴昌永(1980 -), 男, 山东苍山人, 博士, 主要从事污水生物处理技术研究。

E-mail: hit_changyong@163.com

责任作者: 彭永臻

收稿日期: 2011 - 10 - 08

(上接第 4 页)

定运行具有重要作用。

③ 复合干化器内温度分布均匀, 物料充分流化, 干污泥颗粒直径分布在 0 ~ 3 mm 的范围内, 污泥破碎和干化效果好。

④ 污泥焚烧炉内温度分布均匀, 炉膛下部温度为 860 ℃。

⑤ 随着污泥干基热值的降低和含水率的增大, 辅助燃料的消耗量提高, 即增加了污泥焚烧的运行成本。

参考文献:

- [1] Fytli D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU

application of old and new methods—A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(1): 116 - 140.

- [2] Werle S, Wilk R K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective[J]. Renewable Energy, 2010, 35(9): 1914 - 1919.

作者简介: 吕清刚(1963 -), 男, 吉林蛟河人, 博士, 研究员, 从事循环流化床高效低污染燃烧技术的研究和开发工作。

E-mail: zhujianguo@iet.cn

通讯作者: 朱建国

收稿日期: 2011 - 07 - 10