

# 导流板厌氧/限氧循环反应器的污泥减量效果研究

许晓毅<sup>1</sup>, 谢恩<sup>1</sup>, 罗固源<sup>1</sup>, 阙添进<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 中国市政工程西南设计研究院, 四川 成都 610081)

**摘要:** 基于弧形导流板厌氧/限氧混合液半循环反应器,进行了不同工况条件下污泥减量效果的正交试验。结果表明,反应器中污泥混合液的循环速度对污泥减量效果的影响相对较大,且污泥减量反应器的较佳运行条件为:循环速度为0.2 m/s,限氧区DO为1.0 mg/L,HRT为8 h。将减量反应器嵌入A/O脱氮系统的污泥回流旁路,进行了处理生活污水的连续流试验。嵌入减量反应器前后,A/O系统对COD的去除率相差不大,对TN的去除率增加,对TP的去除率受排泥量减少的影响而略微下降。嵌入减量反应器后A/O系统的污泥产率为0.23 gMLSS/gCOD,较对照系统减少约34.0%,污泥脱氢酶活性的平均值提高了约5.6%。经分析,污泥减量反应器的污泥减量机制主要为解耦联作用,其次为污泥在缺乏营养物时进行的代谢衰竭与溶胞。减量反应器中特殊的厌氧/限氧混合液循环,可使其在相对较短的停留时间下就能取得较好的污泥减量效果。

**关键词:** 厌氧/限氧半循环; 污泥减量; 污泥产率

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2010)11-0029-05

## Sludge Reduction in Anaerobic/Oxygen-limited Circulation Reactor with Guide Plate

XU Xiao-yi<sup>1</sup>, XIE En<sup>1</sup>, LUO Gu-yuan<sup>1</sup>, QUE Tian-jin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Southwest Municipal Engineering Design and Research Institute of China, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Based on the anaerobic/oxygen-limited mixture semi-circulation reactor with arc guide plate, orthogonal experiments on sludge reduction under different conditions were carried out. The experimental results show that the circulation rate of sludge mixture has an important effect on sludge reduction. The optimal operation conditions are as follows: circulation rate is 0.2 m/s, DO in oxygen-limited zone is 1.0 mg/L, and HRT is 8 h. Continuous flow tests for domestic sewage treatment were carried out by setting the reactor in the sludge return bypass of A/O denitrification system. Compared to the control process, COD removal rate shows little difference, While TN removal efficiency increases and TP removal efficiency decreases slightly due to the reduction of sludge discharge. The sludge yield in the A/O system after setting sludge reduction reactor is 0.23 gMLSS/gCOD, being 34.0% less than that in the control system. The average dehydrogenase activity is increased by 5.6%. The sludge reduction mechanism is mainly uncoupling followed by mechanism failure and lysis of sludge in lack of nutrient. The special an-

aerobic/oxygen-limited mixture circulation in the reactor can achieve excellent sludge reduction effect at relatively short residence time.

**Key words:** anaerobic/oxygen-limited semi-circulation; sludge reduction; sludge yield

活性污泥法是目前城市污水处理厂应用最广泛的生物处理工艺<sup>[1,2]</sup>,大量剩余污泥的产生、排放与后续处置,已经成为我国重要的环境问题和减排的重要内容之一,因而减少污水处理过程中剩余污泥的产生量具有显著的现实意义。国内外学者的研究表明<sup>[3,4]</sup>,通过在厌氧/好氧环境之间的转换,可使微生物对基质的氧化和 ADP 磷酸化生成 ATP 进行细胞增殖这两个过程产生代谢解偶联,从而减少微生物细胞的合成。基于 OSA 污泥减量工艺存在的厌氧停留时间长以及微生物活性受到一定程度抑制等问题,研发了弧形导流板厌氧/限氧混合液半循环污泥减量反应器(简称污泥减量反应器, SRR),并对工艺条件、运行参数、减量效果与机理等方面进行了研究,以期为该污水处理与同步污泥减量系统运行条件的优化及应用提供技术支持。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

试验流程如图 1 所示。

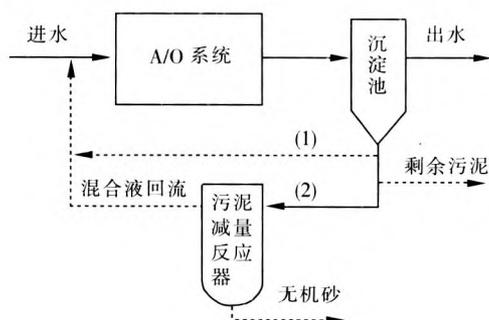


图 1 工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of sewage process

各反应器均用有机玻璃制成。图 1 中的(1)和(2)分别代表传统 A/O 系统以及在污泥回流旁路嵌入污泥减量反应器的减量系统。污泥减量反应器如图 2 所示,其总容积为 42 L,有效水深为 60 cm。沉淀池的回流污泥首先从该反应器上部的进泥口进入厌氧区,从限氧区上部的出泥口回流至 A/O 系统,限氧区采用曝气砂头充氧。由于具有弧形导流板和竖隔墙结合的构型,在半循环区水下推进器和限氧区曝气提升的共同作用下,厌氧区和限氧区的污泥

混合液进行部分交替循环。反应器底部设有排砂管,污泥中少量的无机物(砂)受离心力作用,可沉积于减量反应器底部。

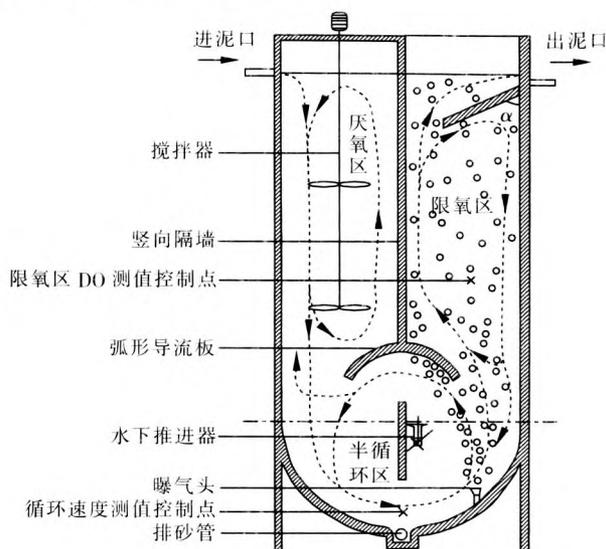


图 2 减量反应器构型示意

Fig. 2 Sketch of sludge reduction reactor

### 1.2 试验方法

为寻求减量反应器的最佳运行参数,进行了  $L_9(3^3)$  正交试验。各试验组的初始污泥浓度均为 4 400 mg/L,按工况参数间歇运行至各反应器停留时间结束后测定剩余污泥量,分析各试验组的减量效果。正交试验的因素及水平见表 1。

表 1 因素及水平

Tab. 1 Factors and levels in orthogonal experiment

因素	循环速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	限氧区 DO/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	HRT/ h
水平 1	0.1	0.5	4
水平 2	0.2	1.0	6
水平 3	0.3	2.0	8

基于正交试验结果,进行了接入减量反应器前后的对比试验。系统连续进水,流量为 7 L/h, A/O 系统曝气池的 DO 为 2.5 mg/L,污泥龄为 13 d,污泥回流比为 70%,总 HRT 为 7 h(A 段和 O 段的停留时间分别为 2 h 和 5 h),系统的 MLSS 平均为 3 100 mg/L。

采用学生宿舍生活污水作为原水。试验中 COD 采用 HACH COD 测定仪测定,脱氢酶活性采用 TTC 法测定<sup>[5]</sup>,其余各水质指标采用标准方法进行测定。

## 2 结果及讨论

### 2.1 正交试验结果

正交试验结果如表 2 所示。

表 2 正交试验结果

Tab. 2 Experimental results of orthogonal tests

试验号	循环速度	限氧区 DO	HRT	总减量/g
1	1	3	1	23.058
2	1	2	2	25.116
3	1	1	3	27.384
4	2	1	1	23.436
5	2	3	2	55.230
6	2	2	3	65.034
7	3	2	1	44.268
8	3	1	2	65.158
9	3	3	3	80.514
$K_1$	75.558	115.978	90.762	
$K_2$	143.700	134.418	145.504	
$K_3$	189.940	158.802	172.932	
$R$	114.382	42.824	82.170	

从表 2 可知,循环速度对污泥减量效果的影响最大,说明反应器的污泥减量机制主要与解耦联作用有关,其次为污泥在缺乏营养物时进行的代谢衰竭。根据正交试验结果,减量效果最优的是第 9 工况,其次为第 8 和第 6 工况,其减量率分别为 43.6%、35.4% 和 35.3%。但试验发现,第 8、9 工况由于循环速度相对较大,导致活性污泥中夹杂的无机物分离效果欠佳。有研究表明<sup>[6]</sup>,随着运行时间的增长,活性污泥系统中的惰性无机物或无机砂将逐渐累积,会直接影响污水处理效果和污泥减量效率。同时第 9 工况的曝气量相对较高,增加了运行能耗。因此,选择第 6 试验组的参数条件运行污泥减量反应器,即循环速度为 0.2 m/s,限氧区 DO 为 1.0 mg/L,污泥减量反应器的 HRT 为 8 h。

### 2.2 连续流系统的污泥减量效果

#### 2.2.1 对污染物的去除效果

在 A/O 系统的污泥回流旁路接入污泥减量反应器前后,系统对 COD、TN、TP 的去除效果如图 3 所示。

在进水 COD 为 219~455 mg/L、TN 为 30.25~62.18 mg/L 和 TP 为 3.12~5.59 mg/L 的条件下,

对比系统出水 COD、TN 和 TP 的平均浓度分别为 22.5、7.85 和 2.28 mg/L,平均去除率分别为 93.80%、81.85% 和 48.45%;减量系统出水 COD、TN 和 TP 的平均浓度分别为 19.4、6.97 和 2.95 mg/L,其对 TN 的平均去除率为 85.01%,较对比系统略有增加,而对 TP 的平均去除率仅为 34.68%。

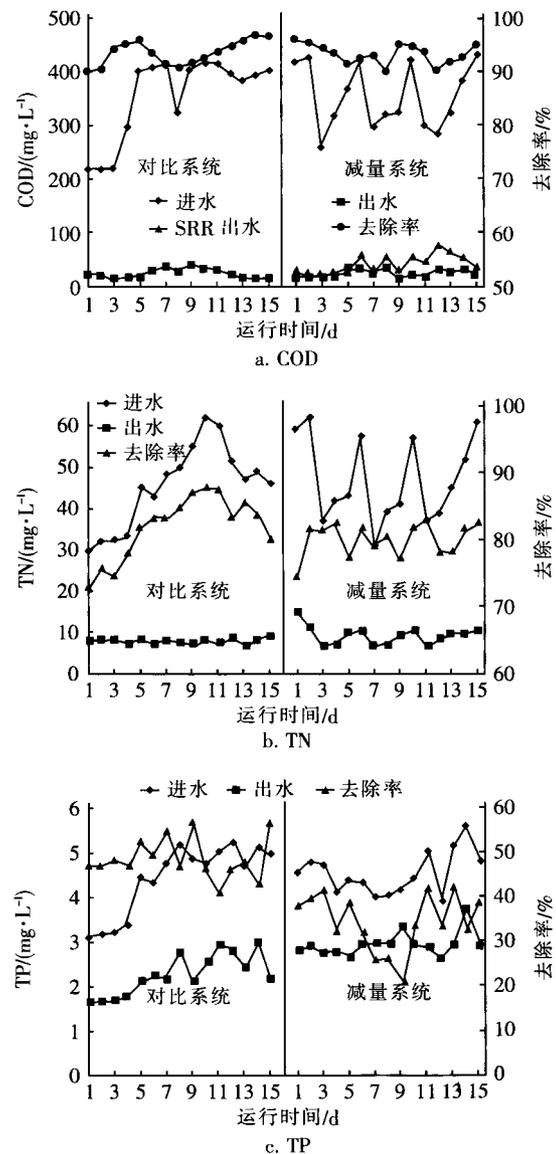


图 3 对 COD、TN、TP 的去除效果比较

Fig. 3 Comparison among COD, TN and TP removal effects

根据图 3(a),回流污泥混合液经污泥减量反应器处理后,其 COD 浓度有所增加,说明发生了一定程度的溶胞作用,有利于 A/O 系统脱氮的碳源补充<sup>[7]</sup>。减量系统的除磷效果较对比系统明显下降,这是由于传统生物除磷是通过排放富磷污泥来实现的<sup>[8]</sup>,而实施污泥减量后剩余污泥的排放量相应减

少,直接影响了磷在系统中的去除。这与传统生物除磷与剩余污泥减量存在矛盾的理论一致<sup>[9,10]</sup>。

### 2.2.2 污泥减量效果和机制分析

在 A/O 工艺稳定运行的过程中,系统(1)、(2)的累积污泥产量(包括系统增加、以剩余污泥形式排放和测试消耗等)与 COD 累积去除量的关系如图 4 所示。

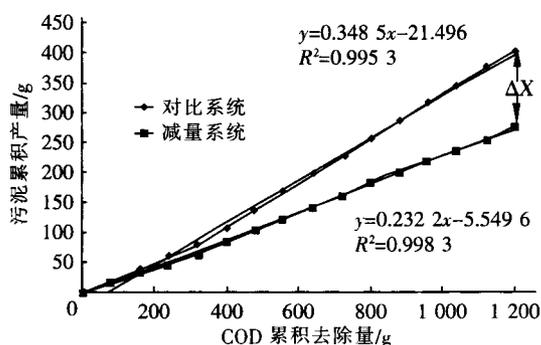


图4 污泥累积排放量

Fig.4 Cumulative production of sludge

由图 4 可知,随着运行时间的延长,系统(2)的剩余污泥减排效果明显。经计算,系统(1)、(2)在 15 d 里的排泥总量分别为 372.7 和 246.9 g(干重),表观污泥产率分别为 0.447 和 0.295 gMLSS/gCOD,可见在污泥回流旁路嵌入减量反应器后,剩余污泥减量率高达 34.0%。

由于减量反应器具有特殊的半循环构型与流态,污泥在进入减量反应器后,通过混合液在限氧区和厌氧区间进行交替循环,可有效发生解耦联作用<sup>[3]</sup>。微生物在 A/O 系统的好氧段和限氧区获得能量并储存于 ATP 中,根据微生物代谢原理,ATP 分子一旦形成,1 min 之内其远端的  $\gamma$ -磷酸基团将迅速水解为无机磷酸分子<sup>[11,12]</sup>,产生的能量用于细胞合成(合成能)和维持基本生命活动(维持能)。当污泥混合液在厌氧区、限氧区间交替循环时,除被用作细胞维持能的能量消耗,大部分合成能由于代谢环境的变化,不能被微生物利用,而是以热量的形式散失<sup>[13]</sup>。

另一方面,沉淀池排泥进入污泥减量反应器后,处于营养物质匮乏状态的污泥混合液在厌氧、限氧区交替循环的过程中,可发生一定程度的衰竭、溶胞效应<sup>[14]</sup>。由于受减量反应器停留时间的制约,该溶胞效应的减量机制并非占主导地位。但限氧区曝气可在一定程度上加快微生物对溶胞产生的营养物质

的利用,这能够促进减量反应器中的溶胞作用。

### 2.2.3 系统污泥性能分析

试验条件下,减量系统的 SVI 平均为 82 mL/g,污泥沉降性能良好。微生物镜检结果表明,嵌入污泥减量反应器后系统中的微生物相更为丰富,原、后生动物的活性较高。这是由于厌氧/好氧、饥饿/营养充足环境的交替,能够更好地刺激不同代谢途径的微生物生长<sup>[15]</sup>。减量反应器的嵌入,使得整个系统的水力停留时间增加,也有利于活性污泥系统中原动物和后动植物的生长<sup>[16]</sup>。减量系统曝气池的脱氢酶活性为 7.82  $\mu\text{gTF}/\text{mgVSS}$ (取 5 次测定的平均值),较对比系统的高出 5.6%(5 次测定的平均值为 7.38  $\mu\text{gTF}/\text{mgVSS}$ )。说明减量系统的限氧/厌氧交替环境能够在一定程度上避免 OSA 工艺厌氧停留时间过长所造成的对活性污泥微生物活性和生物多样性的不利影响<sup>[17]</sup>。这对维持整个污水处理系统降解污染物的能力和保持良好的污泥沉降性能具有重要作用。

## 3 结论

① 基于正交试验得出了污泥减量反应器的较佳运行参数:循环速度为 0.2 m/s,限氧区 DO 为 1.0 mg/L,水力停留时间为 8 h。

② 将污泥减量反应器嵌入 A/O 系统后,对 TN 的平均去除率增加,对 TP 的去除率受排泥量减少的影响而有所下降。减量系统的污泥产率仅为 0.295 gMLSS/gCOD,剩余污泥减排率达到了 34.0%。

③ 污泥减量反应器的污泥减量机制主要为解耦联作用,其次为污泥在缺乏营养物时进行的代谢衰竭与溶胞。减量反应器中特殊的厌氧/限氧混合液循环,可使其在相对较短的停留时间下取得较好的污泥减量效果。

### 参考文献:

- [1] GUO Xue-song, LIU Jun-xin, WEI Yuan-song, et al. Sludge reduction with Tubificidae and the impact on the performance of the wastewater treatment process[J]. J Environ Sci, 2007, 19(3): 257 - 263.
- [2] Tsuyoshi Ichinari, Akitaka Ohtsubo, Tetsunori Ozawa, et al. Wastewater treatment performance and sludge reduction properties of a household wastewater treatment system combined with an aerobic sludge digestion unit[J]. Process Biochem, 2008, 43(7): 722 - 728.

- [3] 林山杉,管运涛. 好氧/厌氧交替与循环工艺用于污泥减量化研究[J]. 工业水处理,2005,25(2):34-37.
- [4] Low E W,Howard A C,Milner M G,*et al.* Uncoupling of metabolism to reduce biomass production in the activated sludge process[J]. *Water Res*,1999,34(12):3204-3212.
- [5] 周春生,尹军. TTC—脱氢酶活性检测方法的研究[J]. 环境科学学报,1996,16(4):400-405.
- [6] 吴健波,刘振鸿,陈季华. 剩余污泥处置的减量化发展方向[J]. 中国给水排水,2001,17(11):24-26.
- [7] 金文标,王建芳,赵庆良,等. 好氧-沉淀-厌氧工艺剩余污泥减量性能和机理研究[J]. 环境科学,2008,29(3):726-732.
- [8] 吉芳英. 排除厌氧富磷污水 ERP-SBR 除磷脱氮工艺研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [9] 吉芳英,左宁,胡玉琴,等. LSP&PNR 工艺的脱氮除磷和污泥减量性能研究[J]. 中国给水排水,2007,23(3):34-39.
- [10] 左宁,吉芳英,万小军,等. 污泥龄对 LSP&PNR 污泥减量新工艺运行效能的影响[J]. 环境工程学报,2008,2(1):105-109.
- [11] 王镜岩. 生物化学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [12] Quayle J R. *Microbial Biochemistry*[M]. England:University Park Press,1979.
- [13] 杨造燕,匡志花,顾平,等. 膜生物反应器无剩余污泥排放的研究[J]. 城市环境与城市生态,1999,12(1):16-18.
- [14] Chen Yinguang,Jiang Su,Yuan Hongying,*et al.* Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs[J]. *Water Res*,2007,41(3):683-689.
- [15] 王建芳,金文标,赵庆良,等. 好氧-沉淀-厌氧工艺处理效能及抗冲击负荷研究[J]. 环境科学,2007,28(11):2488-2493.
- [16] 于安峰. 好氧-厌氧耦合体系污泥减量化的机理研究及工程应用[D]. 北京:清华大学,2008.
- [17] Zhang Zhen-Peng,Show Kuan-Yeow,Tay Joo-Hwa,*et al.* Effect of hydraulic retention time on biohydrogen production and anaerobic microbial community [J]. *Process Biochem*,2006,41(10):2118-2123.

作者简介:许晓毅(1974-),女,重庆人,博士,副教授,从事水污染控制理论与技术的教学和科研工作。

电话:13883402784

E-mail:xuxiaoyi99@126.com

收稿日期:2009-12-24

(上接第28页)

这些不足。

③ 曝气控制系统的实施效果在很大程度上受曝气管路布置的影响,对曝气管路的布置进行优化将有助于实现对溶解氧的有效控制。

#### 参考文献:

- [1] Lee G,Goodley J,尚爱安,等. 工艺优化诊断技术用于污水厂的改造[J]. 中国给水排水,2006,22(2):26-30.
- [2] Liu W,Lee G,尚爱安,等. 应用工艺智能优化控制系统降低污水厂能耗[J]. 中国给水排水,2006,22(8):29-32.
- [3] 沈昌明,王国华,杨殿海,等. 仿真模拟改良倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺的优化运行策略[J]. 中国给水排水,2009,25(9):12-15.
- [4] 张志军. 邯郸市西污水处理厂改良氧化沟工艺优化控制[J]. 中国市政工程,2009,(1):38-41.
- [5] 张志军. 邯郸西污水处理厂处理工艺的优化控制[J]. 城市环境与城市生态,2009,22(4):44-47.
- [6] 朱石清, Lee G,尚爱安,等. 大型污水处理厂工艺优化及改造案例分析[J]. 中国给水排水,2007,23(14):29-32.
- [7] 施炜,王东启,徐鸿德. 营养物强化去除(ENR)污水处理工艺优化的实时监测技术[J]. 水工业市场,2009,(1-2):56-61.
- [8] 杨会龙,张志军,张雅楠. 污水厂改良氧化沟处理工艺的优化控制[J]. 河北科技大学学报,2009,30(3):257-261.

作者简介:杜炯(1976-),男,江苏江阴人,硕士,高级工程师,从事给排水工程设计。

电话:(021)62362384

通讯作者:徐鸿德

收稿日期:2010-01-18