

# 内回流比对内循环式多级 A/O 新工艺的脱氮影响

何争光, 崔战胜, 焦耀亮

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 对比 4 种不同内回流比(50%,100%,150%,200%)时的化学需氧量(COD), $\text{NH}_4^+$ -N 和总氮(TN)的质量浓度,通过改变单一因素内回流比进行平行实验,并在最优内回流比时,检测沿程各段反应池内  $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度.实验结果表明:内回流比并不是越大越好,而是有一个适当的范围;内循环式多级 A/O 新工艺在处理低 C/N 比和高  $\text{NH}_4^+$ -N 污水方面,具有独特的优势,TN 去除率可提高到 80%以上;系统在 内回流比为 100%时,可以实现低费用、高去除率的效果;内回流比为 100%时,可实现短程硝化反硝化.

**关键词:** 内循环; 多级 A/O 新工艺; 高氨氮生活污水; 内回流比

**中图分类号:** X 703.1      **文献标志码:** A

在国家十二五水专项中,重点对污水中的高氨氮进行治理研究.因此,如何实现高氨氮低 C/N 比情况下污水的稳定达标具有研究价值.为了在低能耗的情况下实现高效脱除氮,出现了多段进水 A/O 工艺.该工艺具有脱氮效率高、碳源利用充分、污泥产量少、基建费用低、运行费用省等优点.但是,该工艺处理高氨氮污水时,发现总氮(total nitrogen, TN)超标的问题.虽然提高反应器段数可以提高脱氮率,但这样也会增加系统的复杂性<sup>[1-3]</sup>.目前,我国对分段进水工艺的研究还较少,大多仍处于理论分析和计算机模拟阶段<sup>[4]</sup>.本文在多级 A/O 工艺的基础上,提出了内循环式三级 A/O 工艺系统,并研究该工艺对主要污染物的处理效果、各段对污染物的去除情况和其生物脱氮性能.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

内循环式三级 A/O 实验装置由有机玻璃制成,外形尺寸为 360 mm×350 mm×350 mm(长×宽×高),总容积为 44 L,有效池容为 36 L.实验装置示意图,如图 1 所示.反应器沿长度方向分成相等的 3 段,每段均包含一个缺氧区和一个好氧区,且其体积比均为 2:3.出水从反应器的最后一个好氧池自流进入二沉池,二沉池为竖流中进周出式,其有效容积为 18 L.其工艺平面示意图,如图 2 所示.

### 1.2 试验用水与接种污泥

模拟某城市生活污水水质,用自来水和药品配制的高氨氮、低碳氮比污水为实验用水,其主要水质参数,如表 1 所示.表 1 中: $\rho_{\text{COD}}$ ,  $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ ,  $\rho_{\text{TN}}$  分别为化学需氧量(COD), $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 的质量浓度; $\theta$  为

表 1 进水水质参数

Tab. 1 Water quality parameters of inflow water

项目	$\rho_{\text{COD}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_{\text{TN}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\theta/^\circ\text{C}$	pH 值
进水水质	211~459	54~85	57~88	19~21	7~8
进水平均	368.98	73.17	76.65	—	—

水温. 碳源使用可溶性淀粉, 氮氮采用  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 磷采用  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  和  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 并在配水中投加  $\text{NaHCO}_3$  作为碱度的缓冲药品. 此外, 还在配水中投加多种无机营养盐, 用以提供微生物生长所需的微量元素. 接种污泥取自郑州市五龙口污水处理厂氧化沟曝气段.

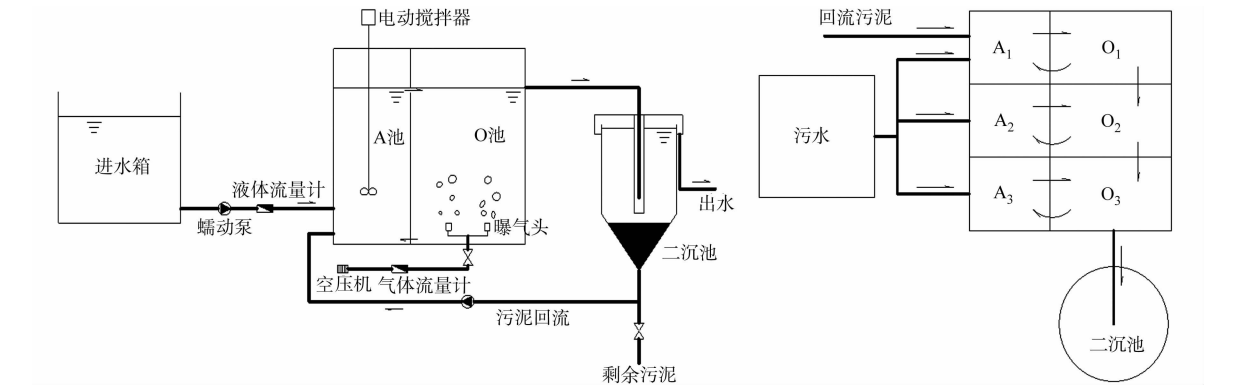


图 1 内循环式三级 A/O 工艺装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of internal cycle three-step A/O process

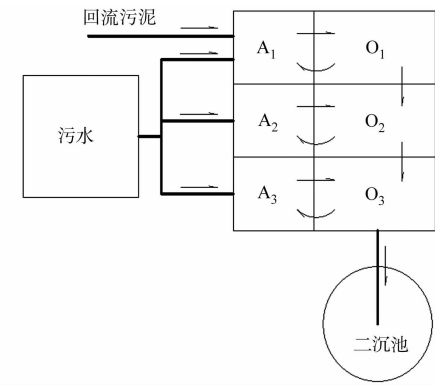


图 2 内循环式三级 A/O 工艺平面示意图  
Fig. 2 Plane schematic diagram of internal cycle three-step A/O process

### 1.3 试验水质分析项目及方法

从工艺装置中取样至 100 mL 烧杯中, 经沉淀后立即测量 COD. 用滤纸过滤后, 测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , 每 1 d 测 1 组数据. COD, TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的质量浓度分别采用重铬酸钾法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法、重氮偶合分光光度法和紫外分光光度法进行测量.

### 1.4 系统运行参数设置

采用的 4 组混合液内回流比分别是 50%, 100%, 150%, 200%. 内回流比是指每一级的回流量与本级进水量之比, 而且每组实验中各级回流比相同. 在这 4 种工况下, 运行稳定后分别连续取 10 d 数据, 一共 40 d, 分别取样分析 COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN 这 3 种指标和系统沿程水质变化, 考察内回流对系统去除效果的影响.

试验参数控制情况, 如表 2 所示. 表 2 中:  $r$  为内回流比;  $Q$  为流量;  $Q_1 : Q_2 : Q_3$  为各级进水流量比;  $\rho_{\text{DO}}$  为溶解氧 (DO) 的质量浓度;  $N$  为污泥回流比;  $t_{\text{HR}}$  为水力停留时间.

表 2 试验参数控制情况

Tab. 2 Control of the experimental parameters

工况	$r/\%$	$Q/\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$	$Q_1 : Q_2 : Q_3$	$\rho_{\text{DO}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$N/\%$	$t_{\text{HR}}/\text{h}$
1	50	3	1 : 1 : 1		50	12
2	100	3	1 : 1 : 1	缺氧区, $<0.5$	50	12
3	150	3	1 : 1 : 1	好氧区, $1.5 \pm 0.5$	50	12
4	200	3	1 : 1 : 1		50	12

## 2 结果与讨论

### 2.1 混合液内回流对 COD 去除效果的影响

当混合液内回流比为 50%, 100%, 150% 和 200% 的情况下, 内循环式三级 A/O 新工艺对 COD 的去除, 如图 3 所示. 图 3 中:  $\rho_{\text{COD}}$  为 COD 的质量浓度;  $r$  为混合液内回流比;  $t$  为运行天数;  $\eta_{\text{COD}}$  为 COD 的去除率;  $\eta_{\text{COD,ave}}$  为 COD 的平均去除率.

在内循环式多级 A/O 新工艺的处理效果中, COD 的去除率是有机物去除效果的一个重要表征指标. 由图 3(a) 可知: 在 4 种不同的混合液内回流比下, COD 的去除率相差不大. 由图 3(b) 可知: COD 平均去除率大致相等. 表明不同的混合液内回流比, 对内循环式多级 A/O 新工艺的 COD 去除影响不明显, 且它们的 COD 出水质量浓度都小于  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水较稳定, 4 种工况下的出水 COD 的质量浓度都能满足一级 A 标准<sup>[5-6]</sup>. 所以, 通过提高混合液内回流比提高 COD 去除率这种做法并不科学.

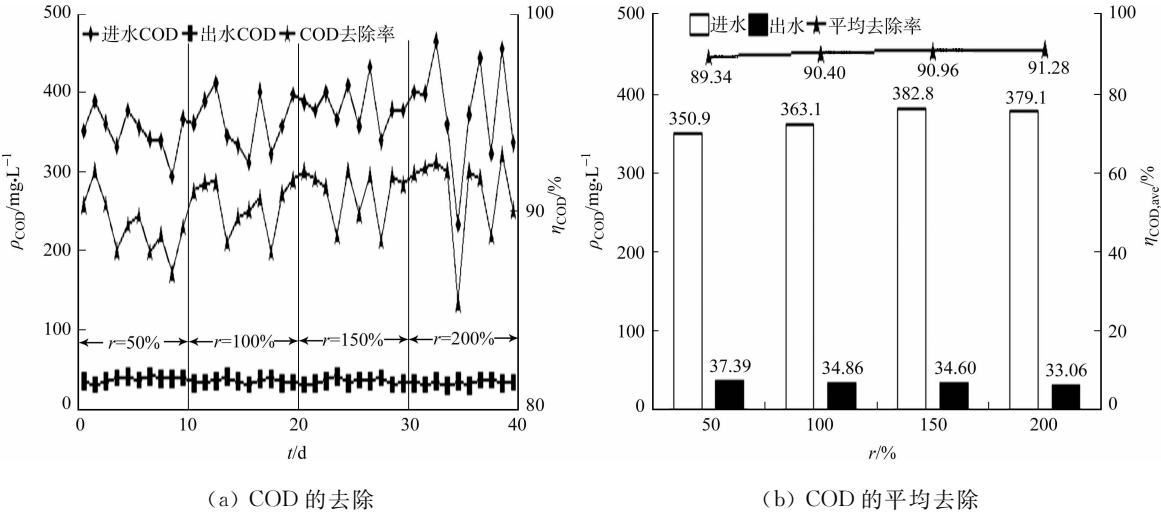


图 3 内循环式三级 A/O 新工艺对 COD 的去除情况

Fig. 3 COD removal efficiencies on internal cycle three-step A/O process

除此之外,混合液内回流比为 50% 时,COD 的去除率偏低;回流比为 100%,150% 和 200% 时,COD 去除率稳中有升,比内回流比为 50% 的情况略高.这是因为通过增大混合液内回流比,系统对有机物的降解能力有所提升,所以对 COD 的去除情况有所改善,但是并不能显著提高系统对总氮的去除率<sup>[7]</sup>.

2.2 混合液内回流对氨氮去除效果的影响

当混合液内回流比分别是 50%,100%,150% 和 200% 时,内循环式三级 A/O 新工艺对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除,如图 4 所示.图 4 中:ρ<sub>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</sub> 为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的质量浓度;r 为混合液内回流比;t 为运行天数;η<sub>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</sub> 为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率;η<sub>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,ave</sub> 为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均去除率.

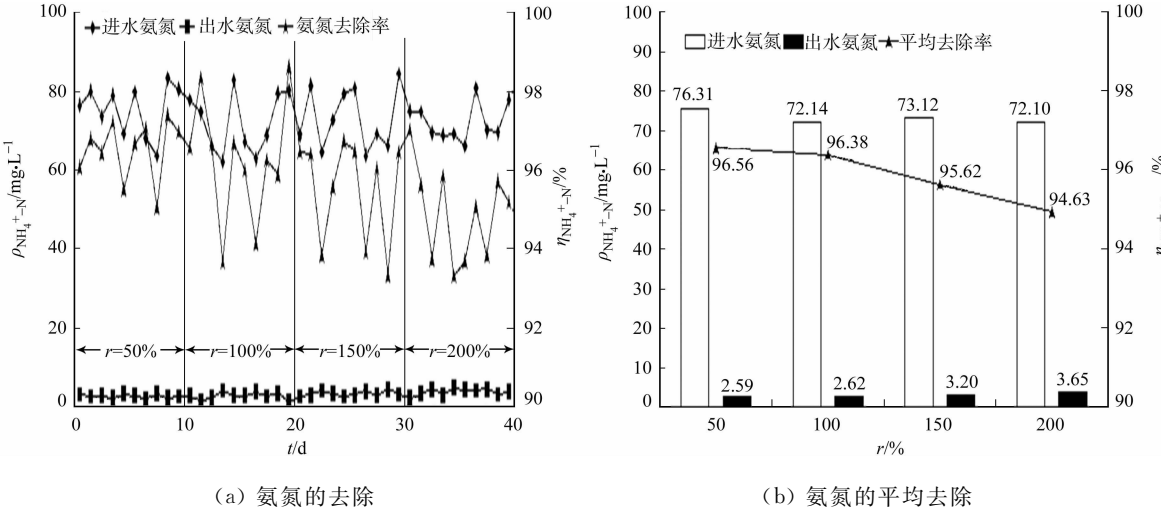


图 4 内循环式三级 A/O 新工艺对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除情况

Fig. 4 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal efficiencies on internal cycle three-step A/O process

由图 4(a)可知:虽然系统在不同混合液内回流比时,进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的质量浓度有所波动,但是出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效果较稳定.由图 4(b)可知:在内回流比分别为 50%,100%,150% 和 200% 时,进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度的平均值分别为 75.31,72.14,73.12 和 72.10 mg·L<sup>-1</sup>,出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度的平均值分别为 2.59,2.62,3.20 和 3.65 mg·L<sup>-1</sup>,对应的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均去除率分别是 96.56%,96.38%,95.62% 和 94.93%.虽然进水有所不同,但是这 4 个工况氨氮的平均出水质量浓度均小于 5 mg·L<sup>-1</sup>.

从平均去除率可知:NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率都比较高,且并不随着混合液的内回流比的提高而显著变化.分析可能是氨氮在去除过程中,硝化作用是氨氮去除的主要影响作用.氨氮在好氧段被亚硝化细菌和硝化细菌分别氧化成亚硝酸盐和硝酸盐,所以,硝化作用的好坏直接影响了氨氮的去除率.因此,混合液内回流比的提高对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率的影响不显著<sup>[6]</sup>.随着混合液内回流比的提高,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率

略有降低,可能是因为内回流作用导致好氧区水力停留时间变短,硝化作用效率不高。

### 2.3 混合液内回流对总氮去除效果的影响

当混合液内回流比分别为 50%,100%,150%和 200%时,内循环式三级 A/O 新工艺对 TN 的去除情况,如图 5 所示。图 5 中: $\rho_{\text{TN}}$ 为 TN 的质量浓度; $r$ 为混合液内回流比; $t$ 为运行天数; $\eta_{\text{TN}}$ 为 TN 的去除率; $\eta_{\text{TN,ave}}$ 为 TN 的平均去除率。

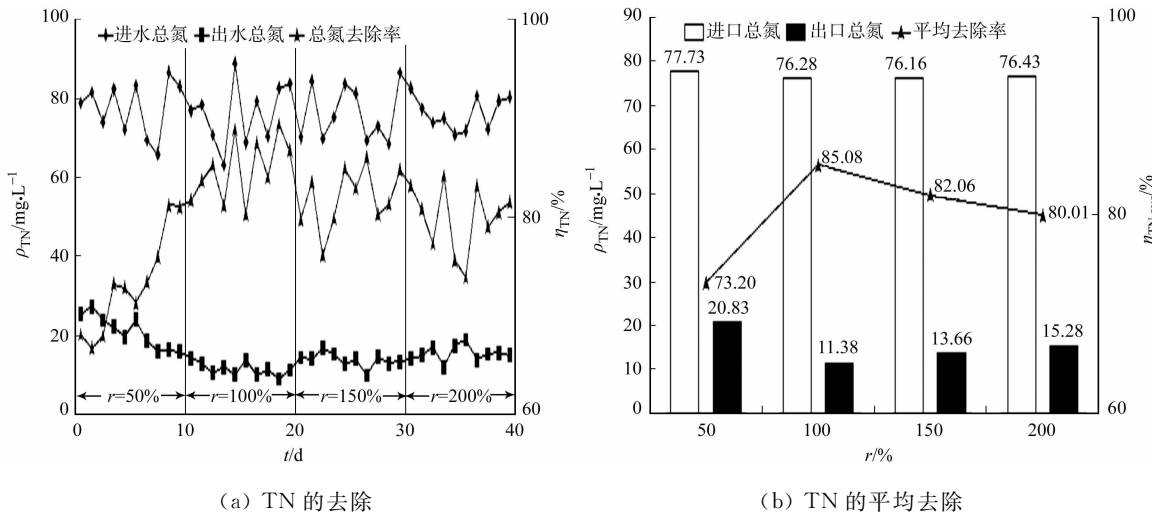


图 5 内循环式三级 A/O 新工艺对 TN 的去除情况  
Fig. 5 TN removal efficiencies on internal cycle three-step A/O process

由图 5 可知:在混合液内回流比分别是 50%,100%,150%和 200%时,进水 TN 质量浓度的平均值分别是 77.73,76.28,76.16 和 76.43  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,出水 TN 质量浓度的平均值分别是 20.83,11.38,13.66 和 15.28  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率分别是 73.20%,85.08%,82.06%和 80.01%。系统的 C/N 比平均为 4.5,属于低碳氮比生活污水。但是,当混合液内回流比为 100%和 150%时,出水 TN 分别为 11.38 和 13.66  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,都小于 15  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,说明系统对碳源有一个较高的利用效率,反硝化效果较好。

当内回流比为 100%和 150%时,TN 去除率相对内回流为 50%时有大幅提高,TN 去除率分别为 85.08%和 82.06%。原因可能有两方面:一方面,提高内回流可以提高污水经历硝化反硝化的次数,增加反硝化反应的时间,同时可以为反硝化提供更多的硝态氮,当有机碳源为某一特定值时,作为电子受体的硝态氮越多,电子供体与受体间的接触更多,反硝化也更激烈;另一方面,提高内回流可以提高缺氧池中的污泥浓度<sup>[3]</sup>,带入的内碳源也更多,反硝化菌可以利用内碳源进行反硝化反应,从而表现出提高 TN 的去除率<sup>[8]</sup>。

同时发现,当回流比为 200%时,TN 的去除率相对于内回流比为 100%和 150%时有所降低,只有 80.01%。究其原因可能是,混合液内回流比的提高会带入更多的溶解氧,氧还抑制硝酸盐还原酶的合成和活性,因为有些反硝化细菌必须在厌氧和有硝态氮存在的条件下,才能诱导合成硝酸盐还原酶<sup>[9-11]</sup>。Pbsz 等<sup>[12]</sup>的实验结果证实,在进水中易生物降解碳源相对较少的情况下,缺氧区氧的存在对反硝化速率有非常大的影响,反硝化速率会显著降低<sup>[13-15]</sup>。混合液回流比的提高会让好氧区和缺氧区的水力停留时间变小,硝化菌和反硝化菌的反应时间变短使反应不是很充分,从而影响脱氮率<sup>[16]</sup>。

### 2.4 $\text{NO}_2^-$ -N 和 $\text{NO}_3^-$ -N 的沿程变化

当混合液内回流比为 100%时,分别测定了该新工艺沿程各段  $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度的变化。分别取各段运行稳定后的平均值,结果如图 6 所示。图 6 中: $\rho_{\text{ave}}$ 为  $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度的平均值。

由图 6 可知:同级的好氧区  $\text{NO}_2^-$ -N 及  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度之和均大于缺氧区。分析原因为好氧区的硝化细菌经过亚硝化作用和硝化作用将氨氮转化为  $\text{NO}_2^-$ -N 及  $\text{NO}_3^-$ -N;而在缺氧区,经过反硝化作用又将  $\text{NO}_2^-$ -N 及  $\text{NO}_3^-$ -N 还原为  $\text{N}_2$  排出系统。

图 6 中,2 种氮素的质量浓度之和在逐级递增,说明  $\text{NO}_x^-$ -N 出现了积累,从而表征了缺氧区的反硝化不足情况。好氧区里 2 种氮素的质量浓度几乎相当,而在缺氧区中, $\text{NO}_2^-$ -N 的质量浓度甚至高于

$\text{NO}_3^-$ -N. 一方面是由于反硝化不足原因所致;另一方面也说明了高氨氮生活污水在该反应器内进行了部分的短程硝化反硝化,基本形成了短程硝化反硝化的模式. 因此,该工艺有深入研究的价值.

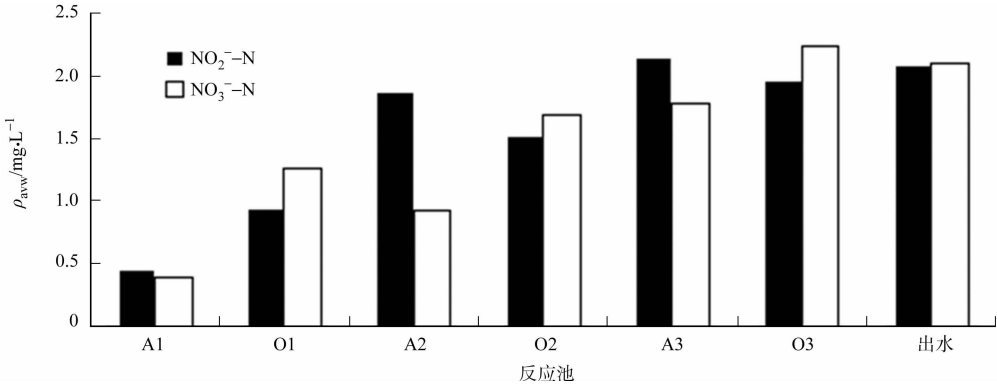


图 6 各反应区的氮素浓度  
Fig. 6 Nitrogen concentration of each reaction area

3 结论

重点研究了混合液内回流对内循环式多级 A/O 新工艺系统性能的影响. 控制其他运行条件不变, 通过改变混合液内回流比, 对比分析不同内回流比时, COD,  $\text{NH}_4^+$ -N, TN 的质量浓度和 100% 内回流比时,  $\text{NO}_2^-$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N 的质量浓度. 得出以下 5 个结论.

1) 内回流比为 50%, 100%, 150%, 200% 时, COD 平均去除率分别为 89.34%, 90.40%, 90.96% 和 91.28%, COD 的平均去除率都比较高, 且出水都能达到一级 A 标准; COD 的去除率随着内回流比的提高略有提高, 系统对有机物的降解有所加强, 但效果并不明显.

2) 混合液内回流比分别为 50%, 100%, 150% 和 200% 时,  $\text{NH}_4^+$ -N 的平均去除率分别为 96.56%, 96.38%, 95.62% 和 94.93%, 去除率都比较高且出水都能达到一级 A 标准, 但内回流比对  $\text{NH}_4^+$ -N 去除效果的影响不明显.

3) 回流比为 100%, 150% 时, TN 的去除率从内回流比为 50% 时的 73.20% 分别提高到 85.08% 和 82.06%. 此时, 出水 TN 也达到了一级 A 标准, TN 去除率得到显著提高; 回流比为 200% 时, TN 去除率与 100% 和 150% 时相比有所降低, 而且出水 TN 低于一级 A 标准. 说明内回流比并不是越大越好, 而是有一个适当的范围.

4) 当进水  $\text{NH}_4^+$ -N 平均质量浓度为  $73.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , C/N 比为 4.5 时, 内循环式多级 A/O 新工艺的 TN 去除率可达到 80% 以上, 且出水 COD,  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 均能稳定达标. 这说明该内循环式多级 A/O 新工艺在处理低 C/N 比污水方面具有独特的优点. 但是, 内回流比越大, 运行费用越高. 为了最大地提高 TN 去除率和降低能耗, 需选择合适的混合液内回流比. 当内回流比为 100% 时, 系统可以实现低费用、高去除率的效果.

5) 当混合液内回流比为 100% 时, 缺氧池中反硝化作用虽然有所减弱, 但是基本实现了短程硝化反硝化. 说明该新工艺对于处理高氨氮生活污水有重要的意义, 对后续工作中关于短程硝化反硝化的研究十分必要.

参考文献:

[1] BOYLE C A, MCKENZIE C J, MORGAN S. Internal recycle to improve denitrification in a step feed anoxic/aerobic activated sludge system[J]. Water Science and Technology, 2009, 60(7): 1661-1668.  
[2] 刘胜军, 杨学, 石凤, 等. 多段多级 A/O 除磷脱氮工艺分析与研究[J]. 给水排水, 2012, 38(增刊 1): 191-194.  
[3] 胡博. 多段进水 A/O 生物膜脱氮工艺运行性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2011: 33.  
[4] ZHU Gui-bing, PENG Yong-zhen, ZHAI Li-ming, et al. Performance and optimization of biological nitrogen removal process enhanced by anoxic/oxic step feeding[J]. Biochemical Engineering Journal, 2009, 43(3): 280-287.

[5] 龚正. 分点进水 A/O 工艺处理生活污水的脱氮性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2010:32.

[6] 国家环境环保总局,国家质量监督检验检疫总局. GB 18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京:中国环境出版社,2003:4.

[7] 杨洋. 城市污水厂 A2/O 工艺效能优化与应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:22.

[8] 张鹏娟. A/O 生物脱氮工艺影响因素及强化运行效果的试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2013:26.

[9] 王佳伟,周军,甘一萍,等. 溶解氧对 A2/O 工艺脱氮除磷效果的影响及解决方法[J]. 给水排水,2009,35(1):35-37.

[10] 邵辉煌,张韵,方先金,等. 城镇污水处理厂强化生物脱氮试验研究[J]. 给水排水,2010,36(4):23-27.

[11] 艾胜书,田曦,任之敏,等. 低温对城市污水处理厂活性污泥特性影响的研究进展[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2013,14(3):41-43.

[12] PLOSZ B G, JOBBAGY A, GRADY C P L. Factors influencing deterioration of denitrification by oxygen entering an anoxic reactor through the surface[J]. Water Research,2003,37(4):853-863.

[13] 郑翔,王荣昌,司书鹏,等. 城市污水的低氧短程脱氮中试研究[J]. 中国给水排水,2011,27(11):9-13.

[14] 龚正,龙腾锐,曹艳晓,等. 分点进水 A/O 工艺处理低碳源生活污水的脱氮性能研究[J]. 环境工程学报,2011,5(1):85-89.

[15] 操家顺,陈洵,方芳. 低溶解氧对改良 A2/O 工艺脱氮除磷的影响[J]. 净水技术,2013,32(6):40-44.

[16] 李松汾. 包钢(集团)公司污水再生回用工程可行性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006:36-37.

## Influence of Internal Reflux Ratio on Performance of a New Internal Cycle Multistage A/O Process

HE Zheng-guang, CUI Zhan-sheng, JIAO Yao-liang

(Department of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** COD,  $\text{NH}_4^+$ -N and total nitrogen (TN) removal efficiencies were analyzed at four different internal reflux ratios (50%, 100%, 150%, 200%), and parallel experiments were made by changing the single factor reflux ratio. The concentrations of  $\text{NO}_2^-$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N in the reactors along the process were detected at the optimal reflux ratio. The results showed that: the internal reflux ratio had an optimal value; the new internal cycle multistage A/O process had a unique advantage for the treatment of low C/N ratio and high  $\text{NH}_4^+$ -N wastewater, and the TN removal efficiency could significantly increase to more than 80%; low cost and high removal efficiency could be obtained when the internal reflux ratio was 100%; short-cut nitrification and denitrification occurred when the internal reflux ratio was 100%.

**Keywords:** internal cycle; new multistage A/O process; high-ammonia nitrogen wastewater; internal reflux ratio

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 刘源岗)