第 39卷 第 4期
2007年 4月

哈 尔 滨 工 业 大 学 学 报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Vol. 39 No. 4
Apr. 2007

分段进水生物脱氮工艺最高脱氮率的探讨

吴淑云[1],祝贵兵[1],彭永臻[1,2]

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,哈尔滨 150090, E-mail: gbzhu@rcees.ac.cn;
2. 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 100022)

摘 要: 根据物料平衡方程重新推导了分段进水生物脱氮工艺的最高理论脱氮率公式,试验考察了不同进水 C/N比条件下,各段等比例进水和非等比例进水时的脱氮率. 在 C/N比为 6、8.25和 10.5(COD恒定为 330mg/L)、各段等比例进水条件下,得出脱氮率分别为 80.1%、79.8%和 81.3%,与公式计算得出的脱氮率相符. 在 C/N比为 10.5、13和 17.5 (NH_3 - N恒定为 38mg/L)的情况下,进行了各段非等比例进水条件下的试验研究. 试验结果表明在进水流量分配系数 λ分别为 2.5、3和 4的情况下,总氮去除率分别为 92.4%、93.8%和 96.4%,远高于已有文献的最高理论脱氮率,与推导的最高脱氮率公式相符.

关键词: 污水处理;生物脱氮;分段进水;脱氮率

中图分类号: X835, Q938.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0367 - 6234(2007)04 - 0594 - 05

Experimental evaluation of nitrogen removal efficiency in step feed biological nitrogen removal process

WU Shu-yun[1], ZHU Gui-bing[1], PENG Yong-zhen[1,2]

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, E-mail: gbzhu@rcees.ac.cn; 2. Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Envinment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The formula of theoretical nitrogen removal efficiency for the step feed biological nitrogen removal process was re - deduced based on the mass balance of nitrate nitrogen and verified by the experiments. Nitrogen removal efficiency under uniform influent flow distribution ratios and different influent flow distribution ratio was verified under different C/N ratios. Under the condition of C/N ratio 6, 8.25 and 10.5 (COD concentration was maintained at 330mg/L) with uniform influent flow distribution ratio in each stage, the nitrogen removal efficiency was 80.1%, 79.8% and 81.3% respectively corresponding to the theoretical value. Under the condition of high C/N ratio 10.5, 13 and 17.5 (NH_3 - N concentration was maintained at 38mg/L) with different influent flow distribution ratios in each stage, nitrogen removal efficiency were studied. The experimental results showed that nitrogen removal efficiency was 92.4%, 93.8% and 96.4% respectively with influent flow distribution ratio λ of 2.5, 3 and 4 respectively, higher than that of reported articles and corresponding to the value of this paper.

Key words: wastewater treatment; biological nitrogen removal; step feed process; nitrogen removal efficiency

分段进水活性污泥工艺是国外近年来新开发并广泛研究的生物脱氮除磷工艺[1-4]. 相对于传统活性污泥工艺,采用分段进水具有如下优点:

1) 有机底物沿池长均匀分布,负荷均衡,缩小了供氧速率与耗氧速率之间的差距,有利于降低能耗,又能够充分发挥活性污泥微生物的降解功能.

2) 污水分段进入,提高了反应器对水质水量冲击

收稿日期: 2005 - 04 - 18.
基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(50521140075); "十一五"国家科技支撑计划项目(2006BAC19B00).
作者简介: 吴淑云(1982—),女,硕士研究生;
彭永臻(1949 -),男,博士生导师.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

负荷的适应能力. 3) 混合液中活性污泥浓度沿池长逐步降低,出流混合液浓度较低,减轻了二沉池的负荷,有利于提高二沉池的固液分离效果. 4) 污水沿池分段进入而回流污泥在首端进入,系统的 SRT(Solid Retention Time)比相同容积的推流系统长. 分段进水系统在不增加反应池出流 MLSS 浓度的情况下,使污泥龄得以增加. 5)硝化液从各段的好氧区直接流入下一段的缺氧区,从而简化了工艺流程[5,6].

1　关于分段进水工艺最高理论脱氮率的分析

文献[7]中给出了分段进水生物脱氮工艺的最高理论脱氮率公式:

$$\eta = \left(1 - \frac{1}{N} \times \frac{1}{1 + r + R}\right) \times 100\ \%. \qquad (1)$$

式中: N 为段数; R 为污泥回流比; r 为硝酸盐回流比.

工艺采用分段进水,每一段硝化产生的硝酸盐完全反硝化所需要的碳源由下一段进水提供,因此工艺达到最高脱氮率应该满足上一段硝化产生的硝酸盐在下一段完全反硝化掉,即不产生硝酸盐的积累且最后一段的进水流量最小. 分段进水生物脱氮工艺的脱氮率受进水流量分配比和进水水质的影响. 工艺达到最高脱氮率时并非各段等比例进水,而是进水流量分配的函数,各段完全反应时,出水总氮由最后一段进水产生,且出水总氮仅为硝态氮. 根据反应器中总氮物料守恒得: $(1 + R) \cdot Q \times S_{ef} = \alpha \cdot Q \times S_{in}$, $S_{ef} = \alpha \cdot S_{in} / (1 + R)$. 则分段进水生物脱氮工艺的理论脱氮率为

$$\eta = 1 - \frac{Q \times S_{ef}}{Q \times S_{in}} = \left(1 - \frac{\alpha}{1 + R}\right) \times 100\%. \qquad (2)$$

式中: S_{ef} 为出水总氮浓度, g/m^3; S_{in} 为进水总氮浓度, g/m^3; α 为最后一段进水占总进水总流量的比值.

文献[7]推导的分段进水生物脱氮工艺的最高理论脱氮率公式是在各段等比例进水的前提下推导的. 但是根据工艺达到最高脱氮率的条件可知工艺达到最高脱氮率时并不一定各段等比例进水,而是进水流量分配的函数.

2　试验材料与方法

2.1　试验装置

试验采用 4段进水形式,反应装置示意图见图 1. 反应器总容积 80 L,各段等容. 沿池长方向设置若干成对的竖向插槽,配以相应大小的插板用于调整缺氧好氧区容积比,本实验采用 $V_{缺} : V_{好} = 1 : 3$. 根据缺氧区所占比例,安放若干搅拌器用于保持泥水混合均匀. 在距池底 20 cm的高度设置若干取样口. 采用鼓风曝气,由转子流量计控制曝气量,控制好氧区 DO质量浓度为 2.0 ±0.1 mg/L. 由温控仪控制温度为 20 ±1 ℃. 采用竖流式沉淀池,沉淀区呈圆柱形,直径为 35 cm;污泥斗为截头倒锥体,倾角为 60 °. 采用中心管进水、周边三角堰出水方式,水力停留时间为 2 h. 采用水力控制 SRT的方法控制 SRT为 20 d. 进水和回流污泥分别由 5台恒流泵调节,污泥回流比恒定为 50%.

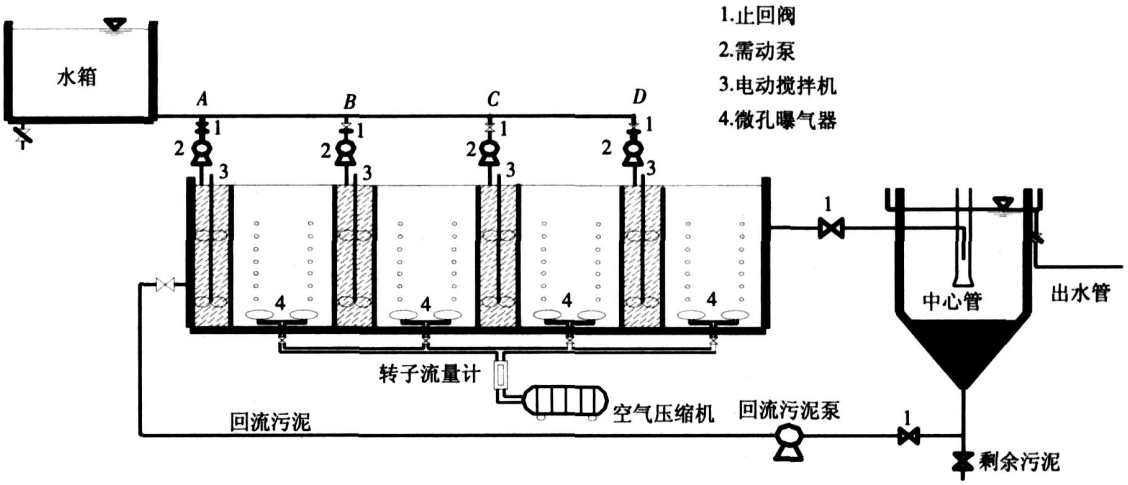

图 1　分段进水生物脱氮系统示意图

2.2　试验水质、分析项目和方法

试验所用污水为啤酒废水、NH_4Cl、$MgSO_4$、$CaCl_2$、KH_2PO_4 和 $NaHCO_3$ 与自来水配制的模拟生活污水. 分析检测项目有 DO、温度、pH、MLSS、

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

COD、氨氮亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和总氮,均采用国标检测方法.

3 结果与讨论

3.1 低和中 C/N比、各段等比例进水条件下脱氮率

试验维持进水 COD恒定为 330 mg/L,通过调节 NH_3 - N以达到不同进水 C/N比.试验考察了进水 C/N比为 6、8.25、10.5、各段等比例进水时的脱氮率,试验结果见表 1.其中进水流量分配系数 λ定义为每相邻两段间进水流量之比.

表 1 低和中 C/N比、各段等比例进水条件下脱氮率 mg/L

C/N	段	NH_4^+ - N		NO_2^- - N		NO_3^- - N		COD	TN及 η/%	λ	α/%
		始端	末端	缺氧段	好氧末端	缺氧段	好氧末端	缺氧段			
6	A	12.80	1.45	0	0.28	0	15.10	82	TN = 10.57 η = 80.78	1	25
	B	7.15	1.49	0	0.42	0	11.14	74			
	C	5.90	1.3	0.1	0.63	0	9.29	62			
	D	5.30	1.1	0.26	1.18	0	8.39	42			
	出水	1		1.18		8.39		20			
8.25	A	10.60	1.7	0	0	0	10.32	80	TN = 7.60 η = 81.09	1	25
	B	8.50	1.65	0	0	0	8.67	72			
	C	4.10	1.4	0	0	0	7.14	64			
	D	3.54	0.85	0	0.17	0	6.68	45			
	出水	0.75		0.17		6.68		14			
10.5	A	2.85	1	0	0	0	6.74	72	TN = 5.86 η = 80.48	1	25
	B	2.05	0.75	0	0	0	6.71	68			
	C	1.35	0.50	0	0	0	6.60	60			
	D	1	0	0	0	0	5.86	56			
	出水	0		0		5.86		8			

当 C/N比为 4.7时,发现碳源明显不足,产生硝酸盐的积累.根据式 (1)计算得当 $N = 4$时脱氮率 $\eta = 83.3\%$,根据式 (2)计算得当 $\alpha = 25\%$时脱氮率 $\eta = 83.3\%$.从表 1可看出在 C/N比为 6、8.25、10.5、各段等比例进水的条件下,脱氮率分别为 80.78%、81.09%和 80.48%,与 (1) 式和 (2) 式结果相近.试验结果表明各段等比例进水时,两个公式均成立.当各段等比例进水时, $\alpha = \frac{1}{N}$,两个公式形式一致,且式 (1)是式 (2)的特殊情况.

3.2 高 C/N比、各段不等比例进水条件下脱氮率

污水以分段的形式进入反应池内而污泥回流至反应池首端,混合液中活性污泥浓度沿池长逐步降低.工艺达到最高脱氮率应该满足上一段硝化产生的硝酸盐在下一段完全反硝化掉,即不产生硝酸盐的积累且最后一段的进水流量最小.试验维持进水 NH_3 - N恒定为 38mg/L,通过调节 COD达到不同进水 C/N比,试验调节 C/N比为 10.5、13和 17.5.经反复试验发现,当进水 C/N比为 10.5、13和 17.5时,进水流量分配系数分别为 2.5、3和 4的情况下,能同时满足不产生硝酸盐的积累且最后一段的进水流量最小.试验结果见表 2.

从表 2可看出当进水 C/N比为 10.5、13和 17.5时,调节进水流量分配系数分别为 2.5、3和 4的情况下,脱氮率能达到 90%以上,远高于式 (1)的计算结果 83.3%,当 λ为 2.5、3和 4时,计算得 α分别为 3.9409% 、2.5%、1.1765%,根据式 (2)计算得 η为 97.3%、98.3%和 99.2%,与试验结果相近.

从表 1和表 2的试验结果可看出分段进水生物脱氮工艺具有较高的脱氮率,脱氮率受进水流量分配比和进水水质特别是 C/N比的影响,当进水 C/N比为 10.5、13、17.5时,调整进水流量分配系数 λ为 2.5、3、4可达最高脱氮率 92.4%、94.76%、96.36%.图 2给出了总氮去除率、进水流量分配系数和进水 C/N比关系.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　高 C/N比、各段不等比例进水条件下脱氮率　　mg/L

C/N	段	NH_4^+ - N 始端	NH_4^+ - N 末端	NO_2^- - N 缺氧段	NO_2^- - N 好氧末端	NO_3^- - N 缺氧段	NO_3^- - N 好氧末端	COD 缺氧段	TN及 η /%	λ	α /%
	A	21.20	7.75	0	0.67	0	10.03	168			
	B	9.75	2.5	0	0.21	0	7.32	52			
10.5	C	5.25	0	0	0	0	5.72	46	TN = 2.89 η = 92.4	2.5	3.9409
	D	0	0	0	0	0.54	2.91	32			
	出水	0		0		2.89		20			
	A	24.25	10.25	0	0.45	0	11.04	252			
	B	15.25	5.25	0	0.28	0	6.62	104			
13	C	6.50	1.50	0	0	0	3.92	56	TN = 2.36 η = 94.76	3	2.5
	D	0	0	0	0	0	2.35	48			
	出水	0		0		2.35		20			
	A	25.50	12	0	0.98	0	12.04	324			
	B	16	3.50	0	0.28	0	9.34	124			
17.5	C	5.75	0.25	0	0	0	3.28	64	TN = 1.42 η = 96.36	4	1.1765
	D	0	0	0	0	0	1.4	48			
	出水	0		0		1.4		20			

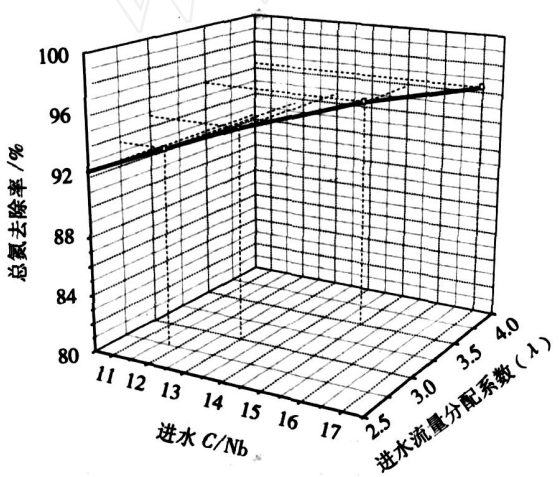

图 2　总氮去除率、进水流量分配系数和进水 C/N关系

3.3　非稳态条件下的试验

根据以上试验,进行了进水流量恒定(240 L/d),进水水质时变条件下的非稳态试验.试验水质如表 3,试验结果见图 3.

从图 3可看出,分段进水生物脱氮工艺具有较高的脱氮率,在(2004年 10月 2日～2005年 1月 1日的试验过程中出水总氮浓度均低于 5 mg/L.需要提及的是,在进水 COD浓度较高的情况下,工艺可按较高流量分配系数运行,但污泥的沉降性能有所下降,SV可高达 125%,有发生污泥膨胀的危险.因此在出水总氮浓度满足要求的情况下,应适当调整流量分配.

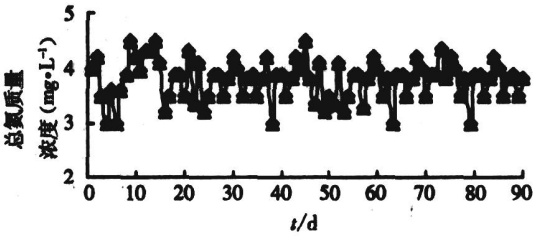

图 3　出水总氮浓度

表 3　试验水质情况　　mg/L

项目	最大值	最小值	平均值
COD	420	200	330
NH_3 - N	50	23	42
NO_2^- N	0.80	0	0.05
NO_3^- N	0.90	0	0.1
TKN	55	28	38

4　结　论

1)根据物料平衡方程重新推导了分段进水生物脱氮工艺 的最高理论脱氮率,得出脱氮率 η =

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$\left(1-\frac{\alpha}{1+R}\right)\times 100\%$. 并进行了试验验证.

2)分段进水生物脱氮工艺脱氮率受进水流量分配比和进水水质的影响,特别是进水 C/N比. 在进水 C/N为 10.5、13和 17.5的条件下,调整流量分配可使总氮去除率分别达到 92.4%、93.8%和 96.4%.

3)在进水 COD浓度较高的情况下,进水流量分配系数较大,有发生污泥膨胀的危险. 因此在出水总氮浓度满足要求的情况下,应适当调整流量分配使各段负荷均匀.

参考文献:

[1] FUKUDA Y, HASHIMOTO K. Denitriication treatment at an existing plant (second part) [J]. Prco of Japan Sewerage Work Association, 1991, 28: 502 - 504.

[2] KITAYA M, HASUNO T, KATAYAMA M. Operation conditions for step denitriication method and its effect [J]. Prco of Japan Sewerage Work Association, 1994, 31: 458 - 460.

[3] GORGUN E, ARTAN E, ORHON D, *et al*. Evaluation of nitrogen removal by step feeding in large treatment plants [J]. Water Sci and Tech, 1996, 34(1 - 2): 253 - 260.

[4] Shigeo Fujii. Theoretical analysis on nitrogen removal of the step - feed anoxic - oxic activated sludge process and it's application for the optimal operation[J]. Water Sci and Tech, 1996, 34(1 - 2): 459 - 466.

[5] ZHU Guibing, PENG Yongzhen, WANG Shuying, et al. Effect of influent flow rate distribution on the performance of step - feed biological nitrogen removal process [J]. Chemical Engineering Journal. doi: 10.1016/j cej 2006.12.023.

[6] ZHU Guibing, PENG Yongzhen. Theoretical evaluation on nitrogen removal of step - feed anoxic/oxic activated sludge process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology. 2006. 13(3): 99 - 102.

[7] 邱慎初,丁堂堂. 分段进水的生物除磷脱氮工艺 [J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 32 - 36.

(编辑 姚向红)

简讯

两个国家重点实验室落户哈尔滨工业大学

哈尔滨工业大学"城市水质保障与水资源可持续利用国家重点实验室"和"先进机器人及系统国家重点实验室"成为 2007年科技部制定建设计划的实验室,近斯将公开招聘实验室主任,并开展下一步的建设工作.

2006年度哈尔滨工业大学在机器人和内陆水体与环境两个领域申报国家重点实验室建设,在主管部门国防科工委的大力推荐下,经过细致、周密的准备工作,顺利通过实验室申请报告的初审、现场考察的评审、集中会议答辩,最终喜获丰收.

此次哈尔滨工业大学大学国家重点实验室的成功申报,是科技部 20年来国家重点实验室建设历史上,首次在同一申报单位同时申报两个重点实验室,并获得批准. 哈尔滨工业大学将以两个国家重点实验室的建设和运行为契机,为突出相关领域学科优势、孕育高水平研究成果和打造高层次人才培养基地奠定坚实基础.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net