

# 脱氮型 UASB 在反硝化处理中的设计和应用

苏秀玲

(清上(苏州)环境科技有限公司, 江苏苏州 215000)

**[摘要]** 根据水质对生物脱氮工艺的设计参数进行优化, 对于提高脱氮处理效果及降低运行成本具有重要意义。某些特定行业产生的高含氮废水中, 硝态氮的浓度远大于氨氮, 对于这种情况, 在考虑生化脱氮工艺时, 可以选用 UASB 反应器作为形成缺氧条件的主反硝化罐。UASB 反硝化罐的设计参数选取可参考:  $1.875 \leq \text{碳氮比} \leq 3.75$  (乙酸钠为碳源), TN 容积负荷取  $1 \sim 2.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 自循环回流比为 50%~100%, 回流点在三相分离器以下悬浮区以上, 反应罐内上升流速为  $1 \sim 3 \text{ m/h}$ , 高径比 1~5。实例中, 处理水量为  $250 \text{ m}^3/\text{h}$ , 进水硝态氮为  $350 \text{ mg/L}$ , 出水硝态氮为  $55 \text{ mg/L}$  时, 项目总设备投资在 6 万元/t 左右 (含全部附属工艺段), 运行费用为 10.17 元/t。采用该工艺处理高含氮废水时, 相比同等水质条件下的 AO 工艺更节省用地, 从而可节省土建投资。选用该工艺时, 污泥产率系数和剩余污泥量的估算, 以及混合液回流比的选择是否可沿用 AO 法的公式等, 仍需进一步研究。

**[关键词]** 脱氮; UASB; 硝态氮; 工艺计算

**[中图分类号]** X703 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2023)04-0184-05

## Design and application of denitrification UASB in denitrification treatment

SU Xiuling

(Tsingshang (Suzhou) Environmental S & T Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract:** Optimizing the design parameters of biological denitrification process according to the water quality has a great significance in improving denitrification treatment effect and reducing operation cost. The concentration of nitrate is much larger than ammonia nitrogen in high nitrogen-containing wastewater generated by some specific industries. For this case, UASB reactor can be selected as the main denitrification tank for the formation of anoxic conditions, while considering biochemical denitrification process. The design parameters of UASB denitrification tank can be set as follows:  $1.875 \leq \text{carbon to nitrogen ratio} \leq 3.75$  (sodium acetate as carbon source), TN volume load between  $1 \sim 2.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , inner-circulating reflux ratio is 50%~100%, reflux point is between the suspension zone and the three-phase separator, inside up flow velocity is  $1 \sim 3 \text{ m/h}$ , and aspect ratio is 1~5. In the example, when the treatment volume was  $250 \text{ m}^3/\text{h}$ , the influent nitrate was  $350 \text{ mg/L}$ , and the effluent nitrate was  $55 \text{ mg/L}$ , the total equipment investment of the project was about 60 000 RMB/t (including all subsidiary process sections), and the operation cost was 10.17 RMB/t. Applying this process to treat wastewater with high nitrogen content, it saves more land than the AO process under the same water quality conditions, thus saving the civil construction investment. The estimation of sludge yield coefficient and surplus sludge amount, as well as whether the mixture reflux ratio can follow the formula of AO method, etc. still need further study.

**Key words:** denitrification; UASB; nitrate; calculations for process

污水水质中的氮元素指标主要有氨氮、硝态氮、凯氏氮、有机氮和总氮 5 种, 其中总氮为各形式含氮污染物的总和。作为生物体中的重要营养元素, 氮元素广泛存在, 会影响受纳水体的生态环境, 引起水华和赤潮等污染事件<sup>[1]</sup>。污水处理工艺的选择与最

终处理效果同各形态含氮污染物的比例有很大关系。市政污水中氨氮占总氮污染物的 75% 左右<sup>[1]</sup>, 一般采用反硝化-硝化工艺生物脱氮。合成氨工业的含氮污染物几乎都为氨氮, 一般采用硝化-反硝化工艺脱氮。近年来, 随着排放标准的提高, 氮的排

排放标准越来越严格。生物脱氮是目前公认的最经济的脱氮方法。优化生物脱氮工艺,针对不同含氮污染物比例找到适合水质特点的设计参数,对提高脱氮处理效果和降低运行成本具有重大意义。

浸胶手套行业、制药行业、光伏行业、电子元件加工、电镀加工行业等产生的污水中硝态氮含量非常大,其中电子元件和电镀加工废水中的硝酸盐质量浓度可达 7 000~50 100 mg/L<sup>[2]</sup>,在总氮中占比很高。笔者针对总氮中硝态氮占据大比例情况的水质进行工艺设计分析。

## 1 工艺的选择及参数确定

常规 AO 法的脱氮率是总回流比的函数<sup>[3]</sup>,按式(1)计算:

$$\eta = (r+R)/(1+r+R) \quad (1)$$

式中: $\eta$ ——理论脱氮率, %;

$r$ ——污泥回流比;

$R$ ——混合液回流比。

当污水中氨氮浓度远低于硝态氮浓度时,  $R$  可能会取到较小的值。可见若选传统 A 池以外的厌氧反应器作为反硝化池,回流的硝化液量不会对反应器内上升流速和水力负荷造成很大影响。

有研究表明,UASB 用作脱氮处理的 A 池具有先天优势和巨大潜力<sup>[4]</sup>。首先,UASB 反应器的结构非常适合反硝化的反应。UASB 反应器由下至上一包括:进水布水系统、污泥床区(占 1/3  $V_{有效}$ )、污泥悬浮区(占 70%  $V_{有效}$ )、三相分离器<sup>[5]</sup>。UASB 反应器内的 DO<0.5 mg/L,形成了良好的缺氧环境<sup>[1]</sup>,为反硝化反应提供了环境条件。反硝化最终的产物为氮气、二氧化碳和水。由此可以看出厌氧反应和反硝化的反应条件和最终产物状态都有相似之处。所以将传统 UASB 反应器作为生物脱氮的 A 池具有较高的可行性。按照实验数据和经验数据,脱氮反应器的容积负荷(以 TN 计,下同)可取 1~2.5 kg/( $m^3 \cdot d$ )<sup>[6]</sup>。

与传统 AO 法类似,污水在进入 UASB 反应器前需要补充一定的营养物质,如碳源和磷源等。补充碳源为乙酸钠时,碳源量按碳氮比取 1.875~3.750,可保证补充的碳源量有效用于反硝化反应,过高的碳氮比容易导致大部分有机碳源用于产甲烷<sup>[7]</sup>。

其次,从占地的角度考虑,UASB 反应器也比较适合作为 A 池。当 UASB 选取合适的高度,同样的停留时间下,由于有效高度的增加而节省部分占地。

传统的 UASB 反应器并没有设置自循环泵。为强化反硝化的效果,抗击冲击负荷,增加自循环泵,自循环回流比为根据经验一般取 0.5~1 倍的进水。同时,内循环(硝化液回流)流量,外循环(污泥回流)流量,自循环(UASB 反应器自循环)流量加上进水流流量在反应器中形成上升水流,上升流速控制在 3 m/h 以内。

增加自循环的另一个优点是利于调节反应器内部的传质阻力<sup>[8]</sup>。反应器内出现的颗粒污泥会因颗粒大小不同而出现分级现象。分级作用小时,传质阻力小,大颗粒污泥不易形成;分级作用大时上层具有处理作用的小颗粒污泥容易流失导致出水水质差。增加可调节流量的自循环泵,由反应器相应的仪表控制,通过对自循环流量的调节,使反应器内的污泥分级作用处在一个合理范围内。自循环取水口在悬浮区之上,三相分离器区之下。

用于脱氮的 USAB 反应器的厌氧环境可以没有传统 UASB 严格,因为产甲烷细菌几乎不参与反应;同时,所产生气体为氮气,没有爆炸危险,洗涤后可以直接排放至大气,不需要类似沼气柜存储装置。

脱氮 UASB 反应器与合适的后处理系统(好氧处理单元用于除碳、硝化处理,去除 COD 和氨氮)配合可以近似看成一种新型 A/O 装置。以 UASB 池作 A 池处理含高硝态氮的化工废水时,其主要设计参数为:碳氮比 1.875~3.750<sup>[7]</sup>、容积负荷 1~2.5 kg/( $m^3 \cdot d$ )<sup>[6]</sup>、自循环回流比 50%~100%<sup>[9]</sup>、上升流速 1~3 m/h、高径比 1~5。

## 2 单体设计及工程实例

以江西某手套厂为例进行工艺设计说明。该厂年产手套 271.68 亿只,产生的污水量为 6 000  $m^3/d$ (即 250  $m^3/h$ )。水质情况:COD<sub>Cr</sub> 400 mg/L、BOD<sub>5</sub> 50 mg/L、总氮 400 mg/L、氨氮 50 mg/L、硝态氮 350 mg/L,假设进水 pH 已由上一级预处理阶段调节完毕,约为中性,实际项目中在去除悬浮物阶段已完成对 pH 的调整。出水要求为下游污水厂纳管标准,即总氮 70 mg/L、硝态氮 55 mg/L、氨氮 15 mg/L。

总工艺流程见图 1。本研究主要讨论一级脱氮单体的设计。

### 2.1 池体设计

该脱氮型 UASB 的 TN 容积负荷  $L_v$  取 1 kg/( $m^3 \cdot d$ ),进水 TN 约 400 mg/L,不是很高,故取下限。污泥质量浓度为 20 g/L(中试实验值,一般 ≥20 g/L)。总容积按

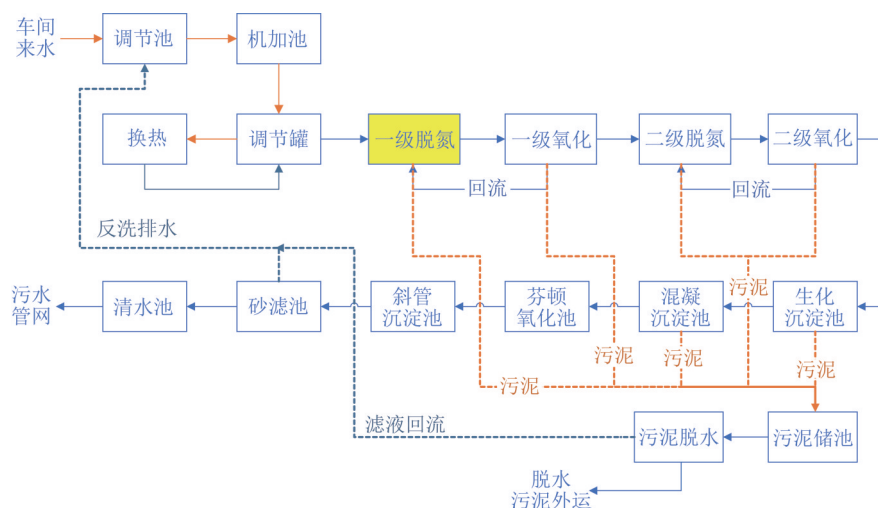


图 1 总工艺流程

Fig. 1 Technological process

式(2)计算。

$$V = \frac{(\rho_i - \rho_o) \times Q}{1\,000 \times L_v} \quad (2)$$

式中:  $V$ ——脱氮 UASB 有效容积,  $\text{m}^3$ ;

$Q$ ——进水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;

$\rho_i$ ——进水总氮, mg/L;

$\rho_0$ ——出水总氮,mg/L。

按 $\rho_i=400 \text{ mg/L}$ 、 $\rho_o=70 \text{ mg/L}$ 、 $Q=6\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $L_v=1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 计算该项目的脱氮 UASB 容积,为  $1\,980 \text{ m}^3$ 。

通过试算确定高径比,为得到较匀称美观的圆柱体,取 $H_{\text{有效}}/D=1.2$ ,则 $V_{\text{单池}} = \frac{D^2}{4} \times \pi \times H_{\text{有效}}$ 。单池体积为 $1\ 980/2$ 即 $990\text{ m}^3$ ,则 $D=10.5\text{ m}$ ,反应区有效高度 $H_{\text{有效}}$ 为 $12.2\text{ m}$ 。由此可知污泥区高度 $H_{\text{污泥}} = H_{\text{有效}} \times 0.3 = 3.7\text{ m}$ ,悬浮区高度 $H_{\text{悬浮}} = H_{\text{有效}} \times 0.7 = 8.5\text{ m}$ 。取缓冲区高度为 $2\text{ m}$ 。自循环回流从位于悬浮区和三相分离区的缓冲区取水。

验算罐内流速。由直径可知单池底面积  $A$  为  $\frac{D^2}{4} \times \pi = 86.55 \text{ m}^2$ 。自循环泵为变频泵,故自循环回流比可以选稍大些,本项目中取 80%。则此时罐内的上升流速为  $v_{\uparrow} = \frac{Q}{A} \times (1 + 80\%) = \frac{\frac{250}{2} \times (1 + 80\%)}{A} = 2.77 \text{ m/h}$ 。其中  $Q$  为小时进水量,符合  $v_{\uparrow}$  在 1~3 m/h 的经验数值,说明该 UASB 反应罐设计合理。同时得出单套 UASB 反应器的自循

环水泵流量  $Q_{\text{自循}}=125\times 80\%=100\text{ m}^3/\text{h}$ , 为变频泵, 一用一备, 扬程需满足最终液位高度和水力损失。

停留时间校核。  $HRT = \frac{V_{\text{单池}}}{Q/2} = \frac{990}{250/2} = 7.92 \text{ h}$ 。

## 2.2 三相分离器设计

三相分离器的典型设计参数见表1<sup>[10]</sup>。

表 1 三相分离器设计主要参数

Table 1 Main design parameters of three-phase separator

序号	设计参数	数值	取值范围
1	沉淀区表面负荷/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	1.5	<1.5
2	沉淀区斜面角度/( $^{\circ}$ )	60	55~60
3	沉淀区斜面高度/m	1.0	0.5~1.0
4	沉淀区停留时间/h	1.5	1.5~2.0
5	回流缝上升流速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	2.5	<2.5

三相分离器在反应罐内的布置和上下层三相分离器平面布置见图2~图3。由于项目选用圆形UASB反应罐,每个三相分离器的长度不一致,故先按典型参数画图布置,随后代入验算,若符合设计要求则采用该设计,若不符合设计要求则从图中改正再次计算。

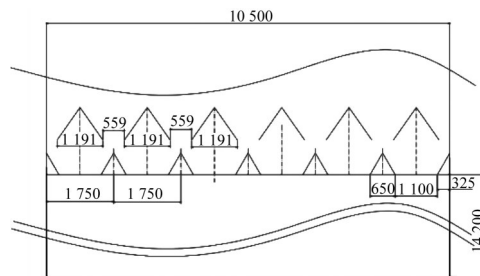


图2 三相分离器在反应罐内的布置

Fig. 2 Arrangement of the three-phase separator in the reactor



脱氮反应器部分的占地面积为  $853 \text{ m}^2$ 。调试期间,调节池至一级脱氮单元的吨水运行成本为 10.17 元,其中药剂费为 9.72 元/t,电费 0.445 元/t(按 0.75 元/(kW·h)计)。项目的总设备投资在 6 万元/t 左右。

若项目采用传统 AO 法设计,由于水质相同,药剂费用方面与脱氮型 UASB 一致。重点在于脱氮型 UASB 节省了土建费用。一级反硝化的反应池容积约在  $6\,600 \text{ m}^3$ ,取有效高度为 7 m,则 A 池的占地约为  $942.8 \text{ m}^2$ 。相比之下脱氮型 UASB 反应器仅占  $172 \text{ m}^2$  左右,第一级脱氮部分节省的土建投资约 147 万(按 1 900 元/ $\text{m}^2$  计)。电费约在 0.42 元/t。

#### 4 结论与探讨

某些特定行业的高含氮废水中,硝态氮的浓度远大于氨氮,针对此种情况,在考虑生化脱氮工艺的时候,可以选用 UASB 反应器作为形成缺氧条件的主反硝化罐。此时 UASB 反硝化罐设计参数的选取可参考:  $1.875 \leq \text{碳氮比} \leq 3.75$  (乙酸钠),容积负荷取  $1 \sim 2.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,增加自循环,回流比为 50%~100%,回流点在三相分离器以下悬浮区以上,反应罐内上升流速为 1~3 m/h,高径比 1~5(大水量取下限)。

当 UASB 选用圆形反应器时,三相分离器的设计需要结合草图进行计算。沉淀区的负荷和回流缝流速可略大,取  $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和 2.5 m/h(矩形池两参数的数值为 1.0、2.0)。

用于脱氮目的的 UASB 工艺目前还未得到广泛应用。除前述提到的参数外,仍有一些问题需要进一步实验和探讨。例如,剩余污泥量的计算尚没有合适的污泥产率系数的参考,从实验看来,污泥产率远低于除碳时的污泥产率。脱氮 UASB 单独应用对总氮的去除率最高达 90%。至于水中的氨氮,脱氮 UASB 反应器内因有少量的厌氧氨氧化或短程反硝化作用可去除部分氨氮,但主要的反应仍在好氧池完成。此时硝化液可能需要部分回流至脱氮 UASB,回流比和 TN 去除率的关系是否继续沿用 AO 法的公式,仍需进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 潘涛,李安峰,杜兵,等. 废水污染控制技术手册[M]. 北京:化学工业出版社,2012:913-1300.  
PAN Tao, LI Anfeng, DU Bing, et al. Handbook on wastewater pollution control technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012:913-1300.
- [2] GLASS C, SILVERSTEIN J. Denitrification of high-nitrate, high-salinity wastewater[J]. Water Research, 1999, 33(1): 223-229.
- [3] 刘臣,樊雪红,徐耀鹏. 基于日本下水道事业团的多级 AO 工艺计算与探讨[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2): 49-53.  
LIU Chen, FAN Xuehong, XU Yaopeng. Calculation and discussion of multi-stage AO process based on Japanese sewage works agency [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 49-53.
- [4] 陈莉莉,左剑恶,楼俞,等. 同时产甲烷反硝化在 UASB 反应器中的实现[J]. 中国沼气, 2006, 24(2): 3-7.  
CHEN Lili, ZUO Jiane, LOU Yu, et al. Study on simultaneous methanogenesis and denitrification in a UASB reactor [J]. China Biogas, 2006, 24(2): 3-7.
- [5] 袁秋笙. UASB 反应器的结构与计算方法[J]. 江苏环境科技, 1999, 12(2): 17-20.  
YUAN Qiusheng. Structure and design methods of UASB reactors [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 1999, 12(2): 17-20.
- [6] 冯有亮. 高效生物脱氮工艺的高氮(硝态氮)废水处理:以某光伏工厂 4 GW 电池片废水项目为例[J]. 低碳世界, 2020, 10(2): 3-4.  
FENG Youliang. High nitrogen (nitrate nitrogen) wastewater treatment of efficient biological denitrification process: A case study of a 4 GW cell wastewater project of a photovoltaic plant [J]. Low Carbon World, 2020, 10(2): 3-4.
- [7] 吴姣姣,黎远梅,谭东梅,等. HRT 对 UASB 厌氧反硝化脱氮的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(5): 1510-1516.  
WU Jiaojiao, LI Yuanmei, TAN Dongmei, et al. Effects of HRT on anaerobic denitrification in UASB [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(5): 1510-1516.
- [8] 方战强,陈中豪,胡勇有,等. 外循环 UASB 的结构与计算方法[J]. 工业水处理, 2003, 23(4): 72-75.  
FANG Zhanqiang, CHEN Zhonghao, HU Yongyou, et al. Structure and design of exterior circulation UASB [J]. Industrial Water Treatment, 2003, 23(4): 72-75.
- [9] 付昆明,苏雪莹,王会芳,等. 内回流对厌氧氨氧化 UASB 反应器脱氮性能的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3560-3566.  
FU Kunming, SU Xueying, WANG Huifang, et al. Effects of internal recycle on the nitrogen removal performance of an ANAMMOX UASB reactor [J]. China Environmental Science, 2016, 36(12): 3560-3566.
- [10] 胡纪萃. UASB 反应器三相分离器的设计方法[J]. 中国沼气, 1992, 10(3): 5-9.  
HU Jicui. Design procedures of gas-solid-liquid separator for the UASB reactor [J]. China Biogas, 1992, 10(3): 5-9.
- [11] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 给水排水设计手册(第 5 册): 城镇排水[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社, 2017: 411-412.  
Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd. Handbook of water supply and drainage design (Volume 5): Urban drainage [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017: 411-412.

[作者简介] 苏秀玲(1985—), 硕士, 注册环保工程师。E-mail: suex0@126.com。

[收稿日期] 2023-03-05(修改稿)