

间歇膨胀复合厌氧反应器的开发及应用

刘建华¹, 胡燕², 金豪杰¹, 白俊跃², 徐灏龙²

(1. 海宁钱塘水务有限公司, 浙江 海宁 314414; 2. 浙江省环境保护科学设计研究院,
浙江 杭州 310007)

摘要: 将脉冲布水技术和复合水解工艺相结合, 开发了间歇膨胀复合厌氧反应器。对复合厌氧/水解反应器的结构、运行参数、配水方式进行了阐述, 讨论了间歇膨胀复合厌氧/水解反应器的污泥沉降性能及流态负荷与膨胀率的关系。分析结果表明, 采用脉冲进水可提高反应器进水过程基质浓度、降低传质阻力, 从而提高反应器反应速率及SS去除率; 当平均上升流速 $<1\text{ m/h}$ 时, 直径 $<0.3\text{ mm}$ 的颗粒污泥可有效保留在反应器内; 当平均上升流速为 $0.45\sim0.88\text{ m/h}$ 时, 其膨胀率达到 $30\%\sim80\%$, 此时反应器为悬浮床反应器。目前该反应器已经应用于集中工业废水、综合城镇污水及制药废水治理, 运行效果良好。

关键词: 间歇膨胀复合厌氧反应器; 颗粒污泥; 上升流速; 膨胀率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)14-0028-05

Development and Application of Intermittent Expansion Anaerobic Hybrid Reactor

LIU Jian-hua¹, HU Yan², JIN Hao-jie¹, BAI Jun-yue², XU Hao-long²

(1. Haining Qiantang Water Co. Ltd., Haining 314414, China; 2. Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

Abstract: An intermittent expansion anaerobic hybrid reactor was developed by combining pulse water distribution technology with hybrid hydrolysis process. The structure, operation parameters and water distribution mode of the intermittent expansion anaerobic hybrid reactor were expounded. The sludge settling property and the relationship between flow load and expansion rate were discussed. The results showed that intermittent expansion anaerobic hybrid reactor could increase the inlet substrate concentration, reduce the mass transfer resistance, so as to improve the reaction rate and SS removal rate; when the average rising velocity was below 1 m/h , the granular sludge with diameter less than 0.3 mm could be effectively retained in the reactor; when the average rising velocity was in the range of $0.45\sim0.88\text{ m/h}$, the expansion rate could reach $30\%\sim80\%$. At this time, the reactor was operated as suspended bed reactor. At present, the intermittent expansion anaerobic hybrid reactor was effectively used to treat industrial wastewater, municipal composite wastewater and pharmaceutical wastewater.

Key words: intermittent expansion anaerobic hybrid reactor; granular sludge; rising velocity; expansion rate

充分的泥水混合效果,是厌氧处理系统稳定运行的保障,而泥水混合流态及设备的开发关键在于泥水混合搅拌方式的研究开发,这是由于搅拌形式会直接影响厌氧反应器的应用范围和运行成本,若以沼气作为主要搅拌动力将使厌氧反应器(UASB为代表)的应用局限于可生化性较好的高浓度有机废水,而以水力搅拌为主的厌氧反应器(EGSB为代表)应用范围较广,可应用于中、低浓度的有机废水治理,但目前这类反应器多采用出水外回流的方式提高其水力搅拌强度,运行成本较大,且对三相分离器要求较高,结构较为复杂,难以大规模推广应用。因此亟需研究开发既能保证足够的泥水混合强度,又能防止污泥的流失,同时结构简单、管理维护方便、运行费用低的搅拌方式和设备。

脉冲布水将连续进水方式变为间歇进水方式,通过瞬间(10~30 s)布水于反应器底部,使泥水剧烈混合,污泥层发生膨胀,布水结束后污泥层沉淀,使污泥层处于周期性的“膨胀-收缩”状态,进而提高溶解性和非溶解性污染物的去除效率。复合水解厌氧反应器是在第2代反应器基础上开发的第3代水解厌氧反应器,其下部是高浓度的活性污泥,上部是由填料及附着的生物膜组成的滤料层,二者的结合很大程度上提高了反应器的有效容积,降低了污泥流失,提高了处理效率。将脉冲布水技术和复合水解工艺相结合,开发了间歇膨胀复合厌氧反应器。将该工艺应用于综合城镇污水、集中式工业废水及医药废水的处理,取得了理想的处理效果^[1~3]。

1 间歇膨胀复合厌氧反应器的工作原理

1.1 结构

间歇膨胀复合厌氧反应器结构如图1所示。

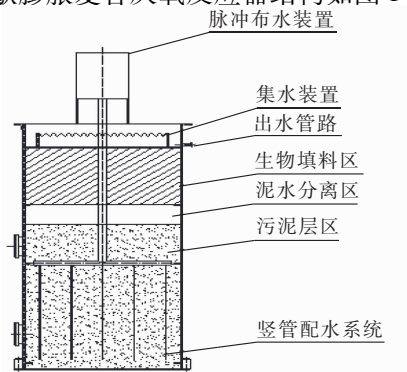


图1 间歇膨胀复合厌氧反应器结构

Fig.1 Structure diagram of intermittent expansion anaerobic hybrid reactor

反应器顶部1/3为填料区,底部2/3为污泥区。间歇膨胀复合水解厌氧处理方法是污水首先进入脉冲布水装置,停留1~10 min后通过反应器底部的配水系统在10~30 s内瞬间布入装置底部,污水瞬间上升流速为2~20 m/h,污水与底部污泥剧烈混合,并使污泥层发生膨胀,布水结束后污泥层收缩至原始位置,从而完成一个“膨胀-收缩”的循环,污水经污泥层及填料区后经集水装置至出水管路流出。

与传统的脉冲布水装置相比,该型脉冲布水装置新增排气系统、脉冲布水水量调节系统、周期调节系统,使得脉冲周期和布水水量可调节;另外,取消布水主管上的中间水箱,使得设备安装和维护难度大大降低,有利于脉冲布水工艺的推广应用。

1.2 配水方式

目前厌氧处理工艺中常用的布水方式为点对点布水和穿孔管布水,其中点对点布水方式不易堵塞,且检修方便,但需要大量的配水管由厌氧反应器顶部深入底部,成本较高,且安装复杂,不适合水量较大的厌氧处理过程。常规的穿孔布水方式适合大水量配水系统,但存在容易堵塞和容易造成反应器短流等问题。为此,开发了竖管布水和旋流布水两种相对优化的布水方式。

① 竖管布水方式

竖管布水的设计出发点是在反应器的污泥层顶部引入布水竖管,避免高浓度的污泥进入布水管,从而避免布水管的堵塞。对于水量较大的污水处理厂(规模 $>2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),需采用大量竖管,成本较高,并不适用。竖管布水形式见图2。

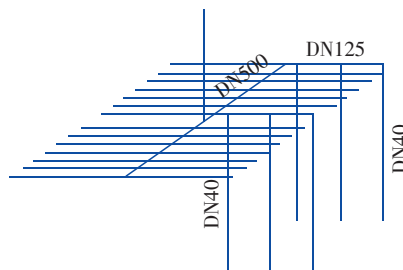


图2 竖管布水示意

Fig.2 Schematic diagram of vertical water distribution

② 旋流布水

对于规模较大的污水处理厂,其水解和厌氧工艺无法采用大的高径比,因此,应重点考虑布水过程

中的短流问题。旋流布水方式的设计出发点是通过布水过程形成旋流推动力,从而形成横向的扰动,进而减少短流和死区的发生和比例。

2 间歇膨胀复合厌氧反应器的污泥膨胀率

在实际厌氧反应器中,颗粒污泥的沉降处于过渡流态($1 < Re < 100$),颗粒污泥的沉淀速度 u_i 可按下式计算^[4]:

$$u_i = 0.781 [d^{1.6}(\rho_s - \rho)/\rho^{0.4}\mu^{0.6}]^{0.714} \quad (1)$$

式中 μ ——废水粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

ρ ——废水密度, kg/m^3

ρ_s ——污泥密度, kg/m^3

d ——颗粒污泥直径, m

水力负荷及气体负荷是影响反应器内固液两相混合程度的重要因素^[5],反应器内假设为液-固两相系统,考虑上升流速 v (液体+气体)对颗粒污泥膨胀程度的影响,气体上升流速的影响可以通过下式进行换算^[6]:

$$\frac{V_g}{V_l} = \frac{S_0 E \xi}{1 + R} \quad (2)$$

式中 V_g ——气体负荷

V_l ——水力负荷

E ——去除率

S_0 ——原水浓度

ξ ——产气系数

R ——回流比

运用描述 Richardson-Zaki 方程可以确定颗粒污泥沉降速度和床层空隙率的关系,该方程表述如下^[7]:

$$u = u_i \varepsilon^n \quad (3)$$

式中 u ——流体上升流速

n ——膨胀指数

ε ——床层空隙率

式(3)中膨胀指数 n 只与颗粒污泥的雷诺数 Re 有关。直径为 2 mm 以下的颗粒污泥其沉降过程的雷诺数在 1~100 范围内^[4],膨胀指数与 Re 的关系为: $n = 4.4Re^{-0.1}$,在颗粒污泥直径为 0.14~0.3 mm 范围内,取 Re 为 1,则 $n = 4.4$ 。

膨胀率与空隙率之间的关系为:

$$\eta = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} \times 100\% \quad (4)$$

式中 η ——床层膨胀率

ε_0 ——床层的初始空隙率,对于近似球形颗

粒, ε_0 一般取 0.4~0.45,在这里可取 0.4

上述计算公式经合并后,可得膨胀率的计算公式:

$$\eta = \frac{e^{\frac{\ln u}{u_i^{4.4}} - 0.4}}{1 - e^{\frac{\ln u}{u_i^{4.4}}}} \quad (5)$$

根据式(5)可在不同流体上升流速下,研究反应器的膨胀行为。假设间歇膨胀复合厌氧反应器内的颗粒污泥直径为 0.14~0.30 mm,分别取 0.14、0.22、0.30 mm;颗粒污泥密度分别为 1 050、1 040、1 030 kg/m^3 ;取废水密度为 1 000 kg/m^3 ,废水粘度为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,则模拟计算结果如图 3 所示。

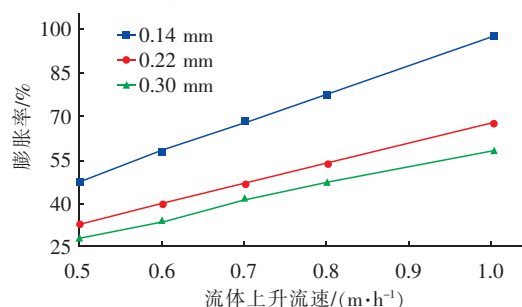


图3 流体上升流速与膨胀率的关系

Fig. 3 Relationship between rising velocity and expansion rate

从图3可以看出,当流速为 0.5~0.8 m/h 时,其膨胀率达到 30%~80%,此时反应器为悬浮床反应器。一般情况下,UASB 反应器的垂直上升流速为 0~3 m/h,在该流速范围内可防止活性污泥的流失,从而保持反应器内较高的污泥浓度;EGSB 反应器上升流速通常为 3~10 m/h,在该流速范围内可使污泥床发生膨胀,从而取得良好的混合效率;运行过程中,间歇膨胀复合厌氧反应器平均水流上升流速保持在 0.45~0.88 m/h,可保证反应器内具有足够的污泥浓度,而间歇水流上升流速恒定保持在 2~20 m/h,能够促使污水和活性污泥充分接触并发生流化,从而提高反应效率,因此,间歇膨胀复合厌氧反应器可以在污泥直径为 0.14~0.3 mm 范围内或无颗粒污泥条件下保持较高的污泥浓度,并通过脉冲布水实现充分泥水混合从而保持较高的处理效率。

3 应用案例

3.1 在集中式工业废水处理中的应用

浙江某集中式工业废水处理厂印染、化工等工

业废水占总进水量的90%以上,出水水质难以达标排放。为此,采用间歇膨胀复合厌氧反应器,开展了持续6个月的提标改造中试研究^[1]。中试水解反应器直径为1.9 m,高度为7 m,有效容积为16.5 m³,污泥区高度为4 m,填料区高度为2 m,布水周期为5 min,布水时间为20 s,平均上升流速为0.42~0.82 m/h,瞬时上升流速为6.3~12.3 m/h,填料区生物载体选用组合填料;接种污泥取自厂区二沉池回流污泥,污泥接种量为10 g/L。

正常运行过程中,反应器0.5~4 m高度的污泥浓度均大于10 g/L,其中0.5 m高度的污泥浓度明显高于其他高度的污泥浓度,且变化范围较大,随反应器高度的增加,污泥浓度逐渐降低,且污泥浓度变化范围缩小,1、2、3、4 m高度的平均污泥浓度呈线性关系,其线性回归方程为 $Y = 16.4 + 1.45X$,线性回归系数 $R = 0.97$ 。

在进水SS浓度为500~800 mg/L条件下,SS去除率最高可达到85%,结果表明该反应器对SS具有良好的去除效果。

中试采用接触氧化+混凝沉淀作为其后处理工艺,运行结果如表1所示。可见,水解出水经后处理后,水质完全达到企业提标排放要求。

表1 出水水质

Tab.1 Effluent quality

项 目	调节池	水解出水	二沉出水	混凝出水	提标要求
COD/(mg·L ⁻¹)	1 084.2	782.0	161.6	95.3	100
pH 值	9.77	9.30	8.60	8.27	6~9
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	37.33	42.31	6.95	6.27	8
TP/(mg·L ⁻¹)	9.08	7.27	3.21	0.39	0.5
色度/倍	173.0	127.0	71.0	14.5	—
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	307.1	247.5	10.9	5.1	20

3.2 在综合城镇污水提标处理中的应用

浙江某10×10⁴ m³/d综合城镇污水处理厂原有污水处理工艺为SBR工艺,改造工艺是在SBR池前增加水解酸化预处理,SBR池后增加混凝沉淀后处理工艺,要求提标后出水水质达到一级B标准^[8]。

水解酸化采用间歇膨胀复合水解工艺,钢筋混凝土结构,半地下式,顶部加盖,水解酸化停留时间为5.1 h,单池尺寸为12 m×12 m×7 m,有效水深为6.2 m,填料高度为3 m,污泥层高度为2.5 m,共24座。

脉冲周期为150 s,其中进水120 s、排水30 s,瞬时水流上升速度为4.8 m/h,采用旋流布水方式。

间歇膨胀复合水解反应器出水经SBR处理后,其COD、NH₄⁺-N、TN分别为65、0.75、17.71 mg/L, SBR出水经混凝沉淀后COD降至60 mg/L以下,各项指标均达到排放标准。

3.3 在制药废水处理中的应用

在某制药厂废水处理的应用中^[9],间歇膨胀复合厌氧工艺主要由脉冲布水器、配水系统、反应器池体等几部分组成。其中:脉冲布水装置为U型管式,不锈钢材质,脉冲周期为6 min,布水时间为15 s;配水系统采用DN40 PVC管,竖管32根,每根竖管服务面积为2 m²,水管出口流速为2.7 m/s;厌氧池体为钢筋混凝土结构,单格尺寸为8 m×8 m×10.5 m,停留时间(HRT)为24 h,污泥区高度为4.5 m,填料区高度为3 m,污水瞬间上升流速为8.9 m/h。

间歇膨胀复合厌氧反应器中0~4.5 m高度为污泥区,4.5~7.5 m为填料区,不同高度的污泥分布情况测定结果表明,污泥浓度的最大值出现在2 m高度,这一结果与采用间歇膨胀水解工艺处理综合城镇污水时最高污泥浓度出现在反应器底部0~1 m的结果不同。造成上述现象的原因如下:①在脉冲布水过程中,瞬间水流上升流速达到8.9 m/h,使污泥层发生膨胀;②进水有机负荷高,气体上升流速较大使污泥发生膨胀。在2~4.5 m污泥浓度逐渐降低,且与反应器高度呈线性关系。在填料区,悬浮污泥浓度亦随高度增加而降低。

观察不同高度处的污泥形态,发现0~3 m高度的污泥皆为沉降性较好的絮状污泥,并伴有少量的颗粒污泥,约占污泥总量的10%,颗粒污泥直径为1~3 mm,3 m以上高度的污泥沉降性能变差,到8 m后微生物已呈分散形态存在。

稳定运行后厌氧反应器对COD的去除率可始终保持在70%以上,且COD去除率随进水有机负荷的提高而逐渐提高,当有机负荷达到10.5 kg/(m³·d)时,COD去除率达到最大值(90.25%),反应器的月平均容积负荷达到9.075 kg/(m³·d)。

4 结论

① 间歇膨胀复合厌氧反应器由脉冲布水装置和复合水解厌氧反应器构成,脉冲周期为2~10 min;布水时间为10~30 s,污水瞬间上升流速为2

~20 m/h,污水与底部污泥剧烈混合,并使污泥层发生膨胀,布水结束后污泥层收缩至原始位置,从而完成一个“膨胀-收缩”的循环。

② 间歇膨胀复合厌氧反应器具有一个平均的水流上升速度和一个间歇性的水流上升速度,流速在0.5~0.8 m/h范围内时,其膨胀率达到30%~80%。

③ 间歇膨胀复合水解/厌氧反应器在集中工业废水、综合城镇污水、制药废水处理中的应用结果表明,在采用絮状污泥接种的条件下,可以保证反应器内具有较高的污泥浓度,在稳定运行条件下,反应器的月平均容积负荷可达到9.075 kg/(m³·d)。

综上所述,间歇膨胀复合厌氧反应器是一种高效率的悬浮床厌氧反应器,系统处理效率高,抗水质冲击能力强,且其结构简单、运行费用低,因此,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 白俊跃,徐灏龙,章一丹,等. 间歇膨胀水解工艺处理综合城镇污水的研究[J]. 中国给水排水,2011,27(7):30-32,36.
Bai Junyue,Xu Haolong,Zhang Yidan,*et al.* Treatment of municipal composite wastewater by intermittent expansion hydrolysis process [J]. China Water & Wastewater, 2011,27(7):30-33(in Chinese).
- [2] 徐灏龙,白俊跃. 棉印染废水处理工艺优化研究[J]. 印染,2011,(16):38-40.
Xu Haolong,Bai Junyue. Optimization of cotton dyeing effluents treatment process[J]. China Dyeing & Finishing,2011,(16):38-40(in Chinese).
- [3] Bai J,Xu H,Zhang Y,*et al.* Combined industrial and domestic wastewater treatment by periodic allocating water hybrid hydrolysis acidification reactor followed by SBR [J]. Biochem Eng J,2013,70(2):115-119.
- [4] 刘永红,贺延龄,李耀中,等. UASB反应器中颗粒污泥的沉降性能与终端沉降速度[J]. 环境科学学报,2005,25(2):176-179.
Liu Yonghong,He Yanling,Li Yaozhong,*et al.* The settling characteristics and terminal velocity of granular sludge in UASB reactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2005,25(2):176-179(in Chinese).
- [5] 郭素红,王凯军,邹安华,等. 旋转流厌氧附着膜膨胀床运行及水力流态研究[J]. 环境污染与防治,2007,29(9):644-647,651.
Guo Suhong,Wang Kaijun,Zou Anhua,*et al.* Hydraulic flow pattern and performance of swirling flow anaerobic attached growth film expanded bed bioreactor[J]. Environmental Pollution & Control,2007,29(9):644-647,651(in Chinese).
- [6] 王凯军,江翰,贺延龄. 厌氧颗粒污泥悬浮床反应器的理论基础初探[J]. 给水排水,2008,34(5):165-169.
Wang Kaijun,Jiang Han,He Yanling. Pilot study on the theoretical fundamentals of anaerobic granular sludge suspended bed reactor[J]. Water & Wastewater Engineering,2008,34(5):165-169(in Chinese).
- [7] Nicolella C,van Loosdrecht M C M,van der Lans R G J M,*et al.* Hydrodynamic characteristics and gas-liquid mass transfer in a biofilm airlift suspension reactor[J]. Biotechnol Bioeng,1998,60(5):627-635.
- [8] 胡燕,白俊跃,马侠,等. 处理综合城镇污水的SBR工艺提标改造研究[J]. 中国给水排水,2015,31(1):17-21.
Hu Yan,Bai Junyue,Ma Xia,*et al.* Upgrading and reconstruction of SBR process for treatment of combined municipal wastewater[J]. China Water & Wastewater,2015,31(1):17-21(in Chinese).
- [9] 徐灏龙,白俊跃,章一丹,等. 间歇膨胀复合厌氧工艺用于处理抗生素废水[J]. 中国给水排水,2012,28(4):61-64.
Xu Haolong,Bai Junyue,Zhang Yidan,*et al.* Application of intermittently expanded anaerobic hybrid reactor to treatment of antibiotic wastewater[J]. China Water & Wastewater,2012,28(4):61-64(in Chinese).



作者简介:刘建华(1979-),男,浙江海宁人,大学本科,海宁钱塘水务有限公司负责人,从事污水处理厂的建设、运营及管理工作。

E-mail: baijunyue@hotmail.com

收稿日期:2018-03-20