

文章编号:1007-2284(2021)04-0085-07

一种适合农村的污水处理技术— 厌氧折流板反应器

刘玲花,李 昂

(中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:在经济技术水平欠发达的农村,寻找可行的废水处理解决方案是一项挑战。城市好氧污水处理厂的建设,运营和维护成本高,并不适合农村。厌氧折流板反应器(ABR)具有结构简单、易于制造、固体生物截留能力强、污泥产量低、抗冲击负荷能力高、对有机物处理效果好、运行成本低等特点,非常适合农村分散污水处理。介绍了ABR反应器的发展与改进,综述了温度、pH、进水有机物浓度、水力停留时间、反应器启动、冲击负荷等因素对ABR处理效果的影响,分析了ABR反应器适宜的污水浓度范围以及在农村应用的可行性,介绍了基于ABR的组合工艺。

关键词:ABR反应器;厌氧处理;组合工艺;农村污水处理

中图分类号:TV21 **文献标识码:**A

刘玲花,李 昂.一种适合农村的污水处理技术-厌氧折流板反应器[J].中国农村水利水电,2021(4):85-91.

LIU L H, LI A. Rural wastewater treatment technology: anaerobic baffled reactor[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(4):85-91.

Rural Wastewater Treatment Technology: Anaerobic Baffled Reactor

LIU Ling-hua, LI Ang

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: As economic and technological levels are underdeveloped in rural areas, finding a viable wastewater treatment solution is a challenge. The construction, operation and maintenance costs of urban aerobic wastewater treatment plants are high and not suitable for rural areas. Anaerobic baffled reactor (ABR) has the characteristic of simple structural design, strong solid biological retention capacity, low sludge yield, high impact resistance, good organic matter treatment and low operating costs, very suitable for rural decentralized wastewater treatment. The development and improvement of ABR reactor in recent years are introduced. The influence of temperature, pH, influent organic matter concentration, hydraulic retention time, reactor start-up, shock load and other factors on the ABR treatment efficiency are summarized. The suitable sewage concentration range of the ABR reactor and the feasibility of its application in rural areas are analyzed, and the combined process based on ABR is introduced.

Key words: ABR reactor; anaerobic treatment; combined process; rural wastewater treatment

随着中国经济社会的快速发展,农村生活污水产生量不断增加,与之不相称的是农村污水处理率却很低。据统计截至2015年,除西藏和港澳台,我国17 848个建制镇中,约25.3%的

建制镇对生活污水进行处理,全国1.15万个乡264.5万个村庄中,仅有7.1%的乡对生活污水进行处理^[1]。

农村地区经济技术落后,所选择农村生活污水技术应具有工艺流程简单、投资省、运行维护管理简便、运行费用低等特点。废水生物处理技术分为好氧和厌氧生物处理技术,城市污水处理厂常用的好氧生物处理技术如活性污泥反应法、生物膜法等,存在投资大、能耗高、运行费用高等缺点,在农村难以推广应用^[2]。与好氧生物处理技术相比,厌氧生物处理技术具有无需曝气通氧,运行费用低,可产生沼气用于能源回收利用等优点^[3]。除此以外,高效厌氧生物反应器还有一项更重要的

收稿日期:2020-07-03

基金项目:国家重点研发计划课题项目(2019YFD1100205);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(WE0145B06 2017)。

作者简介:刘玲花(1965-)女,教授级高级工程师,博士,研究方向为水污染控制及水处理技术。E-mail: lhliu@iwhr.com。

优点是对固体生物的截留能力强,能够在相对较短的水力停留时间(HRT)下维持更高的COD负荷和更长的污泥停留时间(SRT)^[4]。

厌氧折流板反应器(Anaerobic Baffled Reactor,简称ABR)具有结构简单,无需特殊的气固分离系统,污泥产生量低,运行费用低,耐冲击负荷能力强,对毒性物质适应能力强,处理效果好等优点^[5-7]。因而ABR广泛应用于不同类型污水处理中,近些年来,众多学者认识到ABR在经济不发达地区处理废水的优势^[8,9]。

1 ABR反应器的发展

20世纪80年代初,Bachmann等^[10]研发了ABR反应器,该反应器由多个垂直折流板将反应器分割成多个隔室,隔室之间串联运行(图1)。当废水从反应器的进口流向出口时,串联设置的垂直挡板使废水上下折流流动,由于废水的上下折流流动

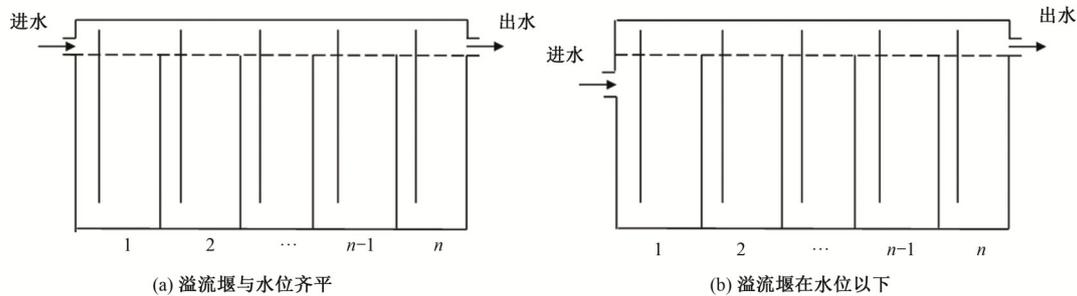


图1 厌氧折流板反应器示意图

Fig.1 Schematic diagram of anaerobic baffle reactor

鉴于大多数厌氧微生物尤其是产甲烷菌的生长速度缓慢,因此ABR反应器设计的主要目标是保证细菌细胞在反应器中具有足够长的停留时间,减少或避免细菌从反应器中流失。Faisal等^[14]将ABR反应器改进为载体厌氧折流板反应器(Carrier Anaerobic Baffled Reactor, CABR),CABR综合了ABR反应器和生物膜反应器的优点,是一种适用于中国农村地区的分散式生活污水处理技术^[15]。Bachmann等^[16]将ABR反应器的上向流室加宽,下向流室变窄,从而更利于微生物和水的接触,改进后的反应器,处理效率得到明显提高。Tilche等^[17]为了减少污泥流失和提高污泥停留时间,对ABR反应器进行改进,研发了复合式厌氧折流板反应器(Hybrid Anaerobic Baffled Reactor, HABR),在最后一个隔室增加了固体沉淀室,将沉淀污泥回流至第一隔室,并在前两个隔室的液面处随机放置了鲍尔环填料,在第三隔室中放置了具有较大孔隙率的波纹填料,从而减少了固体流失,这种结构可以承受更高的进水负荷。汪洋^[18]研究了五隔室HABR处理农村生活污水,在第三、四和五隔室的上向流室添加立体弹性填料,结果表明反应器对COD去除率达到88.85%。Boopathy等^[19]对ABR反应器进行改进,将第一隔室的尺寸增加到原来的2倍,达到10L,第二隔室为5L,用以处理含有大量小颗粒物质的养猪废水,结果表明较大体积隔室对固体小颗粒物质具有良好的保留能力,该反应器的固体含量(20.9 g/L)是三隔室ABR的两倍。

综上所述,研究人员对于ABR反应器的改进主要是:①增大上

和反应过程中产生气体的上升作用,反应器内的细菌发生缓慢上升和沉降运动,从而提高了有机污染物降解速率。ABR反应器的突出特点是多隔室结构,该结构使厌氧产酸和产甲烷作用发生在反应器的不同隔室中,从而使每个隔室中培养驯化出不同类型的微生物^[7],既提高了反应器的处理负荷和处理效率,又增强了反应器的稳定性和对不同影响因素的适应性^[11]。Krishna等^[12]研究了八隔室ABR反应器处理低浓度废水时各隔室微生物的分布情况,发现有机物降解主要发生在最初的几个隔室中,第一隔室的挥发性脂肪酸(Volatile fatty acid, VFA)显著增加,pH明显下降,表明发生了产酸反应,在之后的几个隔室中pH逐步增加,VFA浓度逐渐降低,表明沿着水流方向发生了产酸相和产甲烷相的分离。沈耀良等^[13]采用六隔室ABR反应器处理废水,发现沿着水流方向pH先下降后上升,VFA浓度则先上升后下降,前3个隔室发生了产酸过程,后3个隔室发生了产甲烷过程,表现出明显的产酸和产气分离特性。

向流和下向流隔室的体积比,从而降低上向流隔室的流速。②在隔室中增加不同类型的填料,提高污泥停留时间,防止污泥流失。③让折流板的下部与水平面成45度角。④在最后一个隔室增加沉淀室,将污泥回流至第一隔室等,所有这些改进措施的目的是提高污泥在反应器中的停留时间,减少污泥流失,确保细菌细胞与污染物充分接触,从而提高反应器的处理效能。

2 ABR污水处理的影响因素

2.1 温度

细菌生长繁殖需要适宜的温度条件,通常对于厌氧反应器,最佳温度范围是25~35℃,如果温度低于最佳范围,污染物的去除效率则会下降^[20]。郭昱廷等^[21]研究了15、35和50℃3种温度条件下,ABR反应器的污水处理效果,发现35℃时COD的去除率为96.2%,15℃和50℃时COD去除率仅为70.3%。刘捷等^[22]研究了不同温度条件下ABR反应器的处理效能,结果表明温度对COD去除效果影响不大,在20~37℃的温度范围内,COD去除率超过了93%,温度骤然降到10℃时,起初COD去除率明显下降,但经过15d低温条件驯化,微生物逐渐适应了低温条件,COD去除率又恢复到了92%;但温度对氮、磷的去除效果影响较大,20~37℃温度范围内,氨氮、总氮和总磷去除率维持在97.2%、80.3%和90.4%左右,温度降低到10℃时,氨氮和总氮去除率降低为35.2%和40.4%左右。Feng等^[23]研究了载体

型厌氧折流板反应器在不同温度下的性能,反应器的操作温度最初控制在 28 ℃,然后以每天 1℃的速率降至 18 ℃,接着反应器以恒定的进料负荷运行 10 d,然后在相同的操作条件下以每天 1℃的速率将温度进一步降低至 10 ℃,发现温度影响 SS 的去除,低温下 VFA 浓度高,表明低温下反应速率降低了。有的研究表明当温度降至 15 ℃以下时,反应速率会降低很多^[20,24]。

综上,ABR 反应器对温度有较宽的适应范围,在 15~37 ℃的范围内运行时,温度对 COD 的去除效果影响不大,甚至在 10 ℃的低温条件下,COD 去除率可超过 80%。温度对氮、磷的去除影响大于 COD,温度降低到 10 ℃时,氮和磷的去除率会显著降低。

2.2 pH

pH 是影响 ABR 反应器运行的重要控制因素,pH 值决定了厌氧生物反应系统能否正常运行。ABR 中的 pH 值取决于进水碱度和厌氧生物反应产生的 VFA 浓度,如果产生酸的浓度超过可利用的碱度,反应器将会酸化,pH 值下降,过度酸化会抑制微生物的活性,如果停止产甲烷,VFA 可能会继续积累,进一步恶化反应器的环境条件^[25-27]。ABR 反应器中每个隔室的 pH 值不同,由于发酵细菌的作用,VFA 在初始几个隔室中积累,pH 下降,但随着反应的进行,后面各隔室的 VFA 浓度逐渐降低,碱度逐渐增加,因此 pH 值也逐渐增加^[23]。研究表明由于 VFA 浓度过度累积引起的酸化可导致 ABR 反应器运行的失败^[20],因此,为了防止过度酸化,可以使用碱性物质如 NaOH 和 NaHCO₃ 调节 pH^[27]。刘宇红等^[28]研究了 pH 值和碱度对 ABR 反应器的影响,结果表明:在反应器启动阶段,需要外加碱液提高进水碱度,从而保证各隔室中微生物的良好生长环境,否则很容易产生 VFA 积累,使反应器内 pH 值下降,最终导致启动失败。Foxon^[11]指出原水碱度对稳定 ABR 反应器 pH 值以及对建立稳定的厌氧微生物种群具有重要作用,当 pH 值下降至 6.5 以下时,厌氧过程会受到抑制。

综上,pH 和碱度会对 ABR 反应器处理效能产生一定的影响,pH 低于 6.5 会对 ABR 反应器厌氧过程产生抑制作用,此时需要在进水中添加碱性物质调节 pH。

2.3 进水有机物浓度

进水有机物浓度不会直接影响 ABR 的性能,但可能会影响污染物的去除率。李清雪等^[29]在温度 15~29 ℃,HRT 为 6~24 h 条件下,研究了进水有机物浓度对去除效果的影响,当进水有机物浓度从 267 增加到 1 772 mg/L,COD 去除率从 76% 提高到了 90%。沈耀良等^[30]研究表明进水 COD 浓度为 550~850 mg/L 时,COD 的去除率为 90.2%~95.4%,然而进水 COD 浓度为 150~350 mg/L 时,COD 的去除率仅为 50.3%~80.1%,由此可见进水有机物浓度是反映微生物营养状况的指标,当处理低有机物浓度废水时,应选用较低的 HRT 和较高的进水有机负荷,以确保微生物得到足够的营养,上述研究结果表明 ABR 进水 COD 浓度最好大于 400 mg/L。当处理高浓度废水时,建议使用较低的进水有机负荷以确保有机物被生物完全降解,防止因沼气产量提高而导致污泥漂浮^[20]。

综上,只要进水 COD 浓度不低于 400 mg/L,ABR 反应器都

能达到良好的 COD 去除效果,进水 COD 浓度对 ABR 反应器的处理效能影响不大。

2.4 水力停留时间

水力停留时间是 ABR 反应器的重要控制因素。Zhao 等^[31]在温度为 25 ℃条件下,采用四隔室 ABR 反应器处理污水,研究了 5 个不同的 HRT(20.5、15.3、9.6、5.2 和 2.9 h)和相应的有机负荷[0.30、0.54、0.79、1.92 和 2.55 kg COD/(m³·d)]条件下,对 COD 去除率的影响,发现 HRT 从 20.5 h 降至 15.3 h 时,COD 去除率从 82.5% 增加到 88.1%,HRT 继续降低至 9.6 h,去除率降低至 79.4%,当 HRT 降至 2.9 h 时,COD 去除率进一步降低至 68.4% 左右,因此,最佳 HRT 为 9.6 h。李清雪等^[29]研究发现,反应器 COD 的去除率与 HRT 成正比,HRT 越短,反应器对 COD 的去除率越低,HRT 越长,反应器对 COD 去除率越高;当 HRT 从 24 h 缩短到 6 h 时,COD 去除率从 91.7% 降低到 55.2%,反应器的最优 HRT 为 18 h。许多研究的研究结果表明 COD 去除率随着 HRT 的增加而增加,HRT 达到 48 h 后,COD 去除率趋于稳定^[9,24,31,32]。HRT 太低会影响 COD 的去除率,Bodkhe 等认为 HRT 小于 6^[32],Nasr 等^[24]认为 HRT 小于 12 h,COD 去除率显著降低。在非常低的 HRT 下,ABR 对有机物的去除率降低的原因可能是细菌没有足够的时间来消耗有机物。

HRT 越大,ABR 反应器对污染物的去除效果越好,ABR 反应器的最佳 HRT 为 48 h。HRT 决定了 ABR 反应器中上向流室的上向流速度,为保持良好的处理效能,上向流速度应小于 2 m/L,最佳为 0.1~0.5 m/h。

2.5 反应器启动的影响

ABR 反应器的成功启动是其有效处理污水的先决条件,由于厌氧微生物特别是产甲烷菌的生长速度缓慢,因此,ABR 的启动需要一定的时间。为成功启动 ABR 反应器,建议启动时进水负荷要低,因为在较低的进水负荷下,产气量较低,废水上向流流速慢,利于微生物繁殖。ABR 反应器的启动有两种方式,一种是 HRT 恒定不变,逐步增加进水有机物浓度,一种是进水有机物浓度不变,逐渐增加 HRT,后一种启动方式显示出更好的反应器性能和运行稳定性^[33]。杨春等^[34]研究用 ABR 处理农村生活污水,启动反应器初期采用低进水负荷 0.13 kg/(m³·d),然后逐渐提高进水有机负荷至 2.19 kg/(m³·d),60 d 内反应器完成挂膜,对 COD 的去除率稳定在 66%。班巧英等^[35]采用低负荷、分阶段运行方式启动 ABR 反应器,启动过程分为 3 个阶段:第一阶段采用低负荷运行方式,固定 HRT 为 24 h,然后将进水 COD 浓度从 500 mg/L 逐步提高到 6 000 mg/L,第二阶段采用延长 HRT 与提高进水 COD 浓度交替进行的方式,将 HRT 由 24 h 延长至 48 h,而进水 COD 浓度由 6 000 mg/L 提高到 8 000 mg/L,第三阶段采用固定 COD 浓度,逐步缩短 HRT 的方式,将 HRT 由 48 h 缩短至 36 h。Feng 等^[9]在 48 ℃的温度下以 48 h 的 HRT 进行 CABR 的启动研究,经过三周的运行,有机物去除率和反应器 pH 曲线逐渐趋于稳定,表明反应器获得成功启动,启动初期 pH 逐渐降低,但随后波动减少,并且在 21 d 后观察到沿反应器水流方向 pH 呈温和增加趋势。李清雪等^[30]在 HRT 为 24 h 的条件下启动 ABR 反应器,发现运行 60 d 后,反应器对 COD 的去除率

稳定在80%左右,反应器启动成功,进入正常运行。

ABR反应器正常运行之前需要留出足够的启动时间,以便反应器内产生适量的污泥,ABR反应器成功启动后才能达到良好的污染物去除效果。启动ABR反应器时应采用低进水有机负荷,同时接种适量污泥,然后逐渐提高进水负荷直到出水COD达到稳定值以及恒定的沼气产量。

2.6 冲击负荷的影响

2.6.1 进水有机物冲击负荷

许多研究表明,进水COD浓度变幅达到典型生活污水浓度3倍时,会引起前几个隔室的COD浓度出现增加的现象,但对ABR出水COD浓度影响不大,而且几个小时后,ABR反应器运行情况恢复正常。Krishna等^[36]将HRT固定为8h,研究了进水COD浓度引起的冲击负荷变化对ABR反应器处理效率的影响,进水COD浓度分别在4h和8h内增加了1倍和两倍,仅在前三或四个隔室的COD浓度出现了明显的增加,第一和第二隔室受到的影响最大,第四隔室之后流出的COD浓度基本不变,受到冲击负荷后6h,所有隔室的有机物浓度均恢复到冲击负荷前的水平。Bodkhe^[32]等人的研究表明,尽管进水COD浓度波动很大,但出水COD浓度变化不大。Foxon^[12]的研究发现由于非法倾倒高浓度废水,曾一度导致ABR反应器的酸化和反应器故障,然而非法倾倒事故发生10d后,ABR反应器运行恢复正常。

进水COD浓度突然上升所引起的冲击负荷短时间内会对ABR反应器的前面几个隔室造成影响,引起前面几个隔室的COD浓度增加,但对ABR反应器出水水质影响不大,且经过一定时间后,反应器逐渐适应新的进水负荷,所有隔室的COD浓度又恢复到原来的初始水平。

2.6.2 水力冲击负荷

Krishna^[36]在保持进水COD浓度不变情况下,将HRT从6h突然降到了1h(上向流流速为2m/h),冲击负荷从2kgCOD/(m³·d)增加到了12kgCOD/(m³·d),增加了6倍,发生冲击负荷的初期,反应器VFA的浓度增加,且冲击负荷造成上向流室的上向流速度增加,反应器中约10%的污泥被冲走,因而导致出水COD浓度增加了450%,但冲击负荷发生后不到10h,反应器的COD就又恢复到了以前的处理率和出水水质。

Langenhof等^[37]研究表明HRT为6h时,COD去除率超过了80%,48h内将HRT从6h降到1.3h(上向流的流速为1m/L),仅流失掉少量污泥(0.05gVSS/d),去除率仍维持在40%以上。聂会元等^[38]将进水COD浓度维持在2500~3000mg/L范围内,将HRT由27h降到15h,COD去除率基本没有变化。Krishna等^[39]用ABR处理COD浓度约为500mg/L的废水,运行温度为20~38℃,进水有机负荷在0.6~2kgCOD/(m³·d)之间变化,研究发现ABR在不同进水有机负荷下运行约600d,没有产生剩余污泥,在进水有机负荷最高为2kgCOD/(m³·d)时,COD的去除率也超过88%。

ABR反应器具有较强的抗冲击负荷能力。发生冲击负荷的短时间内,前几个隔室的COD和VFA浓度会受到影响,但对出水水质影响不大,且前几个隔室中的微生物很快就会适应冲

击负荷,COD和VFA浓度也会恢复到初始的水平。由此可见ABR反应器隔室的数量对有机物去除起到重要作用,最初几个隔室主要发生水解和酸化作用,后面几个隔室发生产甲烷作用。

2.7 污泥颗粒化

颗粒状污泥能增强污泥的沉降性能,增加ABR反应器中的生物量,提高污染物的去除效率。许多科研人员在研究ABR反应器时,都观察到了污泥颗粒化现象^[40-42]。李清雪^[43]经过半年时间,在四隔室的ABR反应器中培养出了平均粒径为2~3mm的颗粒污泥。Uyanik等^[44]采用低负荷方式启动ABR,67天后在第二隔室观察到粒径为1~2mm的颗粒污泥,其后的镜检表明,颗粒污泥主要由能消耗H₂/CO₂并以甲酸为底物的微生物组成。

污泥颗粒化直接影响着ABR反应器的启动,在启动过程中,可采用不同方法加速颗粒污泥的形成,促进颗粒化,从而提高ABR反应器的处理效率^[44]:①控制合适的条件如进水负荷、碱度等能够在ABR反应器中培养出颗粒污泥,提高反应器的去除效率和运行稳定性;②在颗粒污泥培养过程中添加无机惰性物质可对颗粒污泥的形成起到积极作用;③在启动初期,保证较高的进水碱度(CaCO₃,1000mg/L)有利于培养出颗粒污泥,颗粒污泥出现以后,再适当降低进水碱度(CaCO₃,500mg/L)。

3 ABR反应器在农村污水处理中的可行性

ABR反应器的应用范围较广,国内外学者利用ABR反应器对多种类型的废水进行了研究(表1)。从表1可以看出,ABR反应器可以有效地处理宽范围浓度的污水包括低浓度和高浓度废水。当废水中的有机物浓度较低时,基质和微生物之间的传质推动力较小,进水负荷低造成产气量较低,从而影响了废水和生物之间的接触,低浓度废水的这些特点对其他厌氧处理技术如上流式厌氧污泥床(UASB)、厌氧颗粒污泥膨胀床(EGSB)等的处理效果会产生较大影响,但对于ABR反应器,可通过减小HRT而达到较好地处理效果。此外从表1可以看出,只要选择适宜的运行条件,ABR反应器对COD的去除率可达到80%~95%。

我国农村地区人口居住分散,地形复杂,建设集中式污水处理管网投资高、运行维护难度大,因此城市集中式污水处理技术在农村不具备优势,需要因地制宜地采用分散污水处理技术,而基于源分离的污水技术是适合农村的污水处理技术,表2是农村源分离污水水质特征^[46],从表2中可以看出,黑水的COD浓度范围在ABR污水处理浓度范围内,可将ABR反应器应用于农村黑水的处理。此外ABR反应器还可用于农村养殖废水、屠宰废水等高浓度有机废水的处理。

上述分析表明,ABR反应器具有良好的抗冲击负荷能力,良好的污泥截留能力,良好的产酸相和产甲烷相分离特性,再加上ABR反应器无需特殊的气固分离系统、无需曝气、运行维护简单、成本低等特点,使其尤其适合农村分散污水处理。

表1 ABR反应器可处理的COD浓度水平

Tab.1 COD concentration level that ABR reactor can treat

废水	HRT/h	隔室数量	进水COD浓度/ (mg·L ⁻¹)	COD去除率/%	进水负荷/ (kgCOD·m ⁻³ ·d ⁻¹)	参考文献
生活污水	3~144	9	400	65.2~94.5	0.10~3.20	[32]
生活污水	18~48	6	305	69.3~79.2	0.20~0.40	[9]
生活污水	8~24	5	680	67.5~85.4	0.67~2.10	[24]
混合废水	6~40	8	500	80.1~90.6	0.30~2.00	[37]
生活污水	22~42	8	680	69.3~81.5	0.36~0.74	[11]
合成废水	6~20	8	500	89.2~93.7	0.60~2.00	[12]
啤酒废水	12	4	1 200	86.6	-	[6]
屠宰废水	24	4	1 500~3 000	83.2	2.10	[45]
淀粉废水	12~24	6	6 400~12 500	72.3~96.5	12.00~18.00	[13]

表2 农村源分离污水水质特征 mg/L

Tab.2 Water quality characteristics of rural source separated sewage

指标	COD	TN	TP
黑水	432~3 856	113.9~376.7	5.70~54.20
灰水	202~639	5.7~25.0	0.40~2.93

4 ABR与其他处理工艺的组合作

农村生活污水可生化性好,非常适合采用生物法进行处理,但是单独采用厌氧生物处理难以达到排放标准,为了获得更好的出水水质,可以将ABR反应器与好氧处理单元联用,从而弥补厌氧处理单元出水水质不能达到排放标准的缺点,同时利用好氧工艺对污水进行深度处理,可以获得良好和稳定的出水水质,此外还能在有效去除COD的同时达到脱氮除磷的目的。

4.1 ABR-人工湿地组合作

人工湿地技术是一种适合农村分散污水的处理工艺,然而有研究表明人工湿地单独处理农村生活污水存在污染负荷低、易堵塞等问题。因此,在采用人工湿地作为农村生活污水处理技术时,需要相应的预处理单元,对污水中有机物与悬浮颗粒进行去除,解决人工湿地堵塞问题,提高人工湿地的运行效果和时间,ABR和人工湿地的组合作是一种适合农村生活污水处理工艺。研究人员采用ABR与人工湿地组合作工艺处理农村生活污水,结果表明组合作对有机物、悬浮物、氨氮、总氮、总磷都有很好的去除效果,出水水质除氨氮外均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》排放标准^[47,48]。朱凯^[49]采用ABR-复合人工湿地组合作工艺处理农村生活污水,结果表明组合作对有机物、氮、磷具有较高的去除能力,COD、NH₄⁺-N、TN和TP的平均去除率在58.2%~84.6%。在ABR-人工湿地组合作工艺中,废水中有机物的去除主要发生在ABR反应器段,氨氮、总氮、总磷主要在人工湿地中得到去除。

4.2 ABR-序批式活性污泥反应器(SBR)组合作

序批式活性污泥反应器(SBR)投资和运行费用低,但抗冲击负荷能力较差^[50],而ABR工艺正好弥补了此缺点,为此将ABR与SBR工艺结合,可以取长补短,能同时有效去除废水中有机物、氮和磷^[51]。叶勇等^[52]采用ABR-SBR组合作工艺处理餐饮污水,在组合作中ABR的主要作用是在厌氧微生物作用

下,将废水中的大分子有机物降解为易于生物降解的小分子有机物,从而提高后续处理单元SBR对有机物和总氮的去除效果,该处理工艺表现出良好的COD、TN、TP去除效果,去除效率分别达到93%、99%和99%。

4.3 ABR-生物接触氧化组合作

用生物接触氧化工艺处理低浓度有机废水可达到很高的处理效率,该工艺出水水质稳定。将ABR与生物接触氧化工艺组合作,可以实现两者的优势互补,且适合村镇生活污水的特点。袁惠萍等^[53]利用ABR-生物接触氧化组合作工艺处理农村生活污水,取得了良好的处理效果,COD和氨氮的平均去除率超过了99.2%,总氮去除率为40%;COD主要在ABR反应器中得到了去除,氨氮主要在生物接触氧化池得到了去除。生物接触氧化作为ABR的后续工艺,起到了稳定和优化出水水质的作用。张彬彬等^[54]采用ABR-生物接触氧化组合作工艺处理农村生活污水,发现组合作对生活污水COD、SS具有良好的去除效果,COD、SS、TN去除率平均分别为81.3%、95.8%和64.7%。

综上,由于单独使用ABR反应器时出水水质尤其是氮磷浓度无法达到我国污水水质排放标准,可以将ABR反应器与其他处理工艺进行组合作,具体选择何种组合作工艺需要结合当地的地理环境、经济技术水平以及排水水质要求等条件来确定,土地富裕的地区可与人工湿地结合,土地紧缺的地区可与生物接触氧化等工艺结合。

5 结 语

通过上述分析可以发现,ABR反应器的应用范围宽广,对低浓度和高浓度有机物废水均有良好的处理效果。在适宜HRT条件,且进水COD浓度不低于400 mg/L,ABR反应器对COD的去除率可达80%~95%,进水COD浓度越高,COD去除率越大。ABR反应器具有较强的抗冲击负荷能力包括抗进水COD浓度冲击负荷和进水水力冲击负荷,冲击负荷一般只会对前1~3个隔室的生物作用产生短暂影响,对后面几个隔室的影响不大。ABR反应器的多隔室结构对其稳定运行起到了非常重要的作用,进水负荷的波动效应会由反应器中多个隔室平衡分担,不会影响整体出水水质。

与城市传统处理技术如活性污泥相比,ABR反应器能量需求低,不需要曝气充氧。具有结构简单,无需特殊的气固分离

系统,污泥产生量低,运行和操作费用低,耐冲击负荷能力强,管理简单,运行成本低等优点,非常适合农村分散污水处理,可用于农村黑水、养殖废水、屠宰废水等不同浓度水平的污水处理。仅用ABR反应器,其处理出水不能满足我国污水排放标准,将ABR与其他类型反应器联用,不仅可弥补厌氧处理出水不能达到排放标准要求的缺点,获得良好和稳定的出水水质,此外还能达到脱氮除磷的目的。

现有的ABR研究结果表明ABR反应器是一种低维护、运行效果稳定的处理系统,但是当前大部分的研究是基于小规模或中试规模试验,实际生产规模ABR反应器的长期运行经验较少。ABR反应器设计的优化还需要通过大量实际规模的ABR反应器的长期运行与监测结果来实现。建议未来在以下几个方面对ABR反应器开展深入研究:如何进一步提高ABR反应器的污泥停留时间,减少污泥流失,如何解决不利影响因素下ABR的过度酸化问题,研究反应器中污染物的降解和代谢机理以及可能产生的中间产物,ABR与其他处理技术的组合。 □

参考文献:

- [1] 谢林花,吴德礼,张亚雷.中国农村生活污水处理技术现状分析及评价[J].生态与农村环境学报,2018,34(10):865-870.
- [2] 刘荣荣,杨波,周建冬,等.厌氧颗粒污泥启动复合式厌氧折流板反应器的研究[J].环境工程学报,2009,3(1):103-107.
- [3] 汪洪生.现代废水厌氧处理应用技术进展[J].污染防治技术,2002,15(3):15-20.
- [4] LIER J BVAN, MAHMOUD N, ZEEMAN G. Anaerobic wastewater treatment. Biological Wastewater Treatment: Principle, Modelling and Design [C]// IWA Publishing, London. 2008:415-56.
- [5] 黄永恒,王建龙,文湘华,等.折流式厌氧反应器的工艺特性及其运用[J].中国给水排水,1999,15(7):18-20.
- [6] 王哲晓,王丽萍,郭光霞,等.厌氧折流板反应器处理啤酒废水的实验研究[J].环保科技,2008,13(3):38-40.
- [7] BARBER W P, STUCKEY D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment, a review [J]. Water Research, 1999,33(7):1599-1578.
- [8] DAMA P, BELL J, FOXON K M, et al. Pilot scale study of an anaerobic baffled reactor for the treatment of domestic wastewater [J]. Water Science and Technology, 2002,46(9):263-270.
- [9] FENG H J, HU L F, MAHMOOD Q, et al. Anaerobic domestic wastewater treatment with bamboo carrier anaerobic baffled reactor [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2008,62(3):232-238.
- [10] BACHMANN A, BEARD V L, MCCARTY P L, et al. Comparison of fixed film reactors with a modified sludge blanket reactor [J]. Pollution Technology Reviews, 1983,10(2):384-402.
- [11] FOXON K M, PILLAY S, LALBAHADUR T, et al. The anaerobic baffled reactor (ABR): an appropriate technology for on-site sanitation [J]. Water SA, 2007,30(5):44-50.
- [12] KRISHNA G V, KUMAR P. Complex wastewater treatment using an anaerobic baffled reactor [J]. Environmental Progress, 2007,26(4):391-398.
- [13] 沈耀良,王惠民.厌氧折流板反应器处理淀粉废水及污泥特性[J].上海环境科学,2002,21(3):139-141.
- [14] FAISAL M, UNNO H. Kinetic analysis of palm oil mill wastewater treatment by a modified anaerobic baffled reactor [J]. Biochemical Engineering Journal, 2001,9(1):25-31.
- [15] 冯华军.分散式生活污水处理工艺开发及机理研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [16] BACHMANN A, BEARD A L, MCCARTY P L. Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor [J]. Water Research, 1985,19(1):99-106.
- [17] TILCHE A, YANG X. Light and Scanning Electron Microscope Observations on The Granular Biomass of Experimental SBAF and HABR Reactors [C]// Granular anaerobic; microbiology and technology, Proceedings of GASMAT Workshop Lunteren, Netherlands, 25-27 October 1987.
- [18] 汪洋.复合式厌氧折流板反应器(HRBR)处理农村生活污水的实验研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- [19] BOOPATHY R, SIEVER D M. Performance of a modified anaerobic baffled reactor to treat swine waste [J]. Transactions of the ASAE, 1991,34(6):2573-2578.
- [20] ZHU G, ZOU R, JHA A K, et al. Recent developments and future perspectives of anaerobic baffled bioreactor for wastewater treatment and energy recovery [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015,45(12):1243-1276.
- [21] 郭昱廷,彭剑峰,宋永会,等.温度对ABR反应器处理效果和微生物群落结构的影响[J].环境科学学报,2012,32(7):1542-1548.
- [22] 刘捷,陆爽君,吴鹏,等.温度对复合厌氧折流板膜生物反应器处理生活污水效能的影响[J].环境工程学报,2014,8(2):553-558.
- [23] FENG H, HU L, MAHMOOD Q, et al. Effects of temperature and feed strength on a carrier anaerobic baffled reactor treating dilute wastewater [J]. Desalination, 2009,239(1):111-21.
- [24] NASR F A, DOMA H S, NASSAR H F. Treatment of domestic wastewater using an anaerobic baffled reactor followed by a duckweed pond for agricultural purposes [J]. The Environmentalist, 2009,29(3):270-279.
- [25] 斯皮思 R E. 工业废水的厌氧生物技术[M].李亚新译.北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [26] ZHANG B, CAI W M, HE P J. Influence of lactic acid on the two-phase anaerobic digestion of kitchen wastes [J]. Journal of Environmental Science, 2007,19(2):244-249.
- [27] AMIRFAKHRI J, VOSSOUGH M, SOLTANIEH M. Assessment of desulfurization of natural gas by chemoautotrophic bacteria in an anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. Chemical Engineering and Processing, 2006,47(5):321-322.
- [28] 刘宇红,曲颖,宋虹,等.pH值和碱度对厌氧折流板反应器运行的影响[J].中国给水排水,2012,28(5):70-73.
- [29] 李清雪,李改翠,李勇.厌氧折流板反应器处理生活污水的影响因素研究[J].河北师范大学学报/自然科学版,2010,34(5):579-582.
- [30] 沈耀良,孙立柱,管闻,等.ABR反应器处理低浓度废水研究[J].江苏环境科技,2004,17(4):1-2.

- [31] ZHAO J, SHI Y S, LU Q J. Experimental Study for ABR to Treat the Domestic Sewage [C]// Advanced Materials Research, 2012, 393:1 217-1 223.
- [32] BODKHE S Y. A modified anaerobic baffled reactor for municipal wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(8):2 488-2 493.
- [33] LIU R, TIAN Q, CHEN J. The developments of anaerobic baffled reactor for wastewater treatment: a review [J]. African Journal of Biotechnology, 2010,9(11):1 535-1 542.
- [34] 杨 春,吕锡武. 农村生活污水处理 ABR 工艺的启动与污泥微生物特性[J]. 净水技术,2017,36(5):79-85.
- [35] 班巧英,刘 琦,张立国,等.ABR 启动期运行效能及互营产甲烷菌群的分布特征[J]. 中国环境科学,2018,38(9):3 351-3 357.
- [36] KRISNA G G, KUMAR P, KUMAR P. Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. Bioresource technology, 2008,99(17):8 193-8 200.
- [37] LANGENHOFF A A M, INTRACHANDRA N, SYUCKEY D C. Treatment of dilute soluble and colloidal wastewater using an anaerobic baffled reactor: influence of hydraulic retention time[J]. Water Research, 2000,34(4):1 307 - 1 317.
- [38] 聂会元,孙长领,谢瑞英,等. 负荷变化对 ABR 运行效果的影响[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(4):129-131.
- [39] KRISHNA, KUMAR P G. Treatment of low-strength soluble wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(1):166-176.
- [40] 强绍杰. ABR 一接触氧化工艺处理漂染废水[J]. 给水排水, 2003,29(4):47-49.
- [41] 崔玉波. 厌氧填料折流板反应器的启动试验[J]. 中国给水排水,2002,18(7):75-76.
- [42] 邱 波,郭 静. ABR 反应器处理制药废水的启动运行[J]. 中国给水排水,2000,16(8):42-44.
- [43] 李清雪,华玉枝. 厌氧折流板反应器处理高浓度有机废水[J]. 河北建筑科技学院学报,2003,9(3):2-3.
- [44] UYANIK S, SALLIS P J, ANDERSON G K. The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor(ABR) part I: Process performance[J]. Water Research, 2002,36(4):933-943.
- [45] 杨 建,聂一波,李东伟. ABR 反应器处理有机废水的运行特性研究[J]. 水处理技术,2009,35(1):42-45.
- [46] 刘玲花,张盼伟,王启文. 基于源分离的农村分散式生活污水处理技术[J]. 水利水电技术,2019,50(6):196-202.
- [47] 赵大传,杜家伟. ABR-人工湿地组合工艺处理生活污水[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2011,235(1):97-101.
- [48] 李清雪,杜秀省,王冬云. 厌氧折流板-垂直潜流人工湿地处理农村生活污水的研究 [J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2012,36(3):281-285.
- [49] 朱 凯,刘小鹏,程继辉,等. 厌氧折流板反应器-复合人工湿地处理农村生活污水中试研究 [J]. 水处理技术,2014,40(12): 95-99.
- [50] 胡宝兰,陈旭良,郑 平,等. 两种 Anammox 反应器性能的对比研究[J]. 环境科学学报,2005,25(4):545-551.
- [51] 程凯英,廖 戈,林励忠. ABR-SBR 组合工艺处理食品调味料废水[J]. 环境工程,2002,20(2):26-28.
- [52] 叶 勇,汪家权. ABR-SBR 组合工艺处理食堂污水研究[J]. 环境工程学报,2011,10(5):2 298-2 302.
- [53] 袁惠萍,彭昌盛,王 震. 厌氧折流板反应器-生物接触氧化池联合工艺处理新兴农村生活污水试验[J]. 水处理技术,2012,38 (4):91-95.
- [54] 张彬彬,李艳菊,王开春,等. 厌氧折流板反应器-生物接触氧化组合工艺处理生活污水研究[J]. 环境污染与防治,2012,34(8): 21-25.

(上接第 80 页)

- [16] 张新华,李红霞,肖玉成,等. 河流最小生态基础流量计算方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2011,9(1):66-73.
- [17] 孙 斌,邢立亭,李常锁. 趵突泉泉域岩溶水典型污染组分变化特征及污染途径[J]. 中国岩溶,2018,37(6):810-818.
- [18] 管清花,李福林,王爱芹,等. 济南市岩溶泉域地下水化学特征与水环境演化[J]. 中国岩溶,2019,38(5):653-662.

(上接第 84 页)

参考文献:

- [1] 刘宏哲,娄 夏,刘曙光,等. 含植物水流动力特性研究进展[J]. 水利水电科技进展,2019,39(4):85-94.
- [2] 刘彦东. 植物对河道水流特性的影响研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [3] 尹愈强,杨轶凡,崔世恒,等. 植物不同排列方式对明渠水流影响的试验研究[J]. 中国水运,2014,14(3):169-171.
- [4] HUAI WX, WANG WJ, ZENG YH. Two-layer model for open channel flow with submerged flexible vegetation [J]. Journal of Hydraulic Research, 2013,51: 708-718.
- [5] SHI JZ, LI YH, JOCELYNE MH, alet, Hydrological characteristics of vegetated river flows: a laboratory flume study [J]. Hydrological Sciences Journal, 2013,58(5):1 047-1 058.
- [6] 闫 静,唐洪武,田志军,等. 植物对明渠流速分布影响的试验研究[J]. 水利水运工程学报,2011(4):138-142.
- [7] 李 炜. 水力计算手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [8] 张明武. 具有植被漫滩的复式河槽水流特性研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [9] 拾 兵,王川源,尹则高,等. 淹没植物对河道糙率的影响[J]. 中国海洋大学学报,2009,39(2):295-298.
- [10] 槐文信,韩 杰,曾玉红,等. 淹没柔性植被对明渠恒定水流水力特性的试验研究[J]. 水利学报,2009,40(7):791-797.
- [11] 张 玮,钟春欣,应瀚海. 草皮护坡水力糙率实验研究[J]. 水科学进展,2007,18(4):483-489.
- [12] 李艳红,赵 敏. 含植物河流动力学实验研究一流速、摩阻流速及曼宁糙率系数垂线分布[J]. 水动力学研究与进展,2004,19 (4):513-519.