

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.09.016

三级UASB耦联A/O处理高COD纤维素醚生产废水

郑斐州¹, 任志宏², 陈宇航¹, 王丛¹, 李伟宪³, 李福勤¹

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 山西职业技术学院 继续教育与培训部, 山西 太原 030006; 3. 河北利仕化学科技有限公司, 河北 邯郸 057550)

摘要: 河南省某化工厂的纤维素醚生产废水经过物化单元处理后COD仍然高达45 000~46 000 mg/L,为实现稳定达标,采用三级UASB耦联A/O工艺对其进行处理,重点考察了组合工艺的启动特性及污染物去除效果。结果表明,三级UASB在温度为35 °C、进水pH>6.8条件下,进水COD从3 000 mg/L逐步提高到45 000~46 000 mg/L,HRT由45 d缩短至6.7 d,稳定运行后COD去除率保持在97%以上,UASB1对COD的平均去除率达到80%,远超过UASB2(13%)和UASB3(3%),pH表现为UASB1<UASB2<UASB3,各级UASB的挥发性有机酸/总碱度(VFAs/TA)均低于0.3,平均产气率达到2.28 L/(L·d),单位有机物产气量达到349.82 mL/gCOD。A/O工艺满负荷运行后,在混合液回流比为200%、污泥回流比为100%、污泥龄(SRT)为12.5 d条件下,COD、TN、NH₃-N、TP去除率分别为84.81%、78.82%、98.39%、77.38%,运行稳定,出水水质达到了河南省《化工行业水污染物间接排放标准》(DB41/1135—2016)和园区污水处理厂收水标准。

关键词: 三级UASB; A/O工艺; 高COD化工废水; 启动

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)09-0108-08

Three-stage UASB Coupled with A/O Process for Treating High COD Cellulose Ether Production Wastewater

ZHENG Jiongzhou¹, REN Zhihong², CHEN Yuhang¹, WANG Cong¹, LI Weixian³, LI Fuqin¹

(1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Continuing Education and Training Department, Shanxi Vocational and Technical College, Taiyuan 030006, China; 3. Leache Chem Ltd., Handan 057550, China)

Abstract: The wastewater from a cellulose ether production plant in Henan Province still had a COD of 45 000 mg/L to 46 000 mg/L after physical and chemical treatment. To achieve stable compliance, a three-stage UASB coupled with A/O process was adopted for its treatment. The start-up characteristics and pollutants removal effect were investigated. The results showed that under the conditions of 35 °C and influent pH>6.8, the influent COD of the three-stage UASB was gradually increased from 3 000 mg/L to 45 000–46 000 mg/L, and the HRT was shortened from 45 days to 6.7 days. After stable operation, the COD removal rate remained above 97%, with an average COD removal rate of 80% in UASB1, far exceeding that of UASB2 (13%) and UASB3 (3%). The pH separation was UASB1<UASB2<UASB3, and the ratio of volatile fatty acids and total alkalinity (VFAs/TA) of each stage was less

基金项目: 河北省自然科学基金智慧矿山联合基金资助项目(E2021402015)

通信作者: 李福勤 E-mail: lifuqin2003@163.com

than 0.3. The average gas production rate reached 2.28 L/(L·d), and the gas production per unit organic matter was 349.82 mL/gCOD. After the A/O process was fully loaded, with the mixed liquor return ratio of 200%, sludge return ratio of 100%, and SRT maintained at 12.5 days, the removal rates of COD, TN, NH₃-N, and TP were 84.81%, 78.82%, 98.39%, and 77.38%, respectively. The operation was stable, and the effluent met the *Indirect Discharge Standards for Water Pollutants in the Chemical Industry* (DB41/1135-2016) in Henan Province and the receiving water standards of the wastewater treatment plant in the industrial park.

Keywords: three-stage UASB; A/O process; high COD chemical wastewater; start-up

在我国化学工业迅猛发展的今天,各类化工产品生产过程中产生的高浓度有机废水日益增多。此类废水普遍具有化学需氧量(COD)高、成分复杂、生物毒性大等特点,其高效、稳定处理已成为制约行业绿色可持续发展的瓶颈之一。传统活性污泥法作为处理化工废水的常用技术,在面对这类复杂高COD废水时,会出现负荷冲击耐受性差、曝气能耗高及剩余污泥处理成本大等问题^[1]。

升流式厌氧污泥床(UASB)反应器因其容积负荷高、污泥产率低、可回收沼气能源等优势,在高浓度有机废水生化处理领域应用广泛^[2]。然而,单一厌氧技术对复杂化工废水中难降解有机物及毒性物质的适应性有限,出水往往难以直接达到排放标准,且对氮、磷等营养盐的去除效果甚微^[3-4]。缺氧/好氧(A/O)工艺在生物脱氮方面效果显著,具有良好的抗冲击负荷能力,但对进水COD浓度有上限要求^[5]。因此,将厌氧与好氧工艺进行合理耦联,优势互补,是处理高COD难降解化工废水的有效技术路线^[6]。

虽然组合工艺在化工废水处理中应用前景广阔,但要使其高效稳定运行并实现预期目标,关键在于启动阶段(涉及接种污泥选择、有机负荷提升梯度、各反应器协同控制)能否培育出特异性强且高效稳定的微生物群落。特别是对于纤维素醚生产废水这类高COD难降解化工废水,其生化处理系统的启动特性仍有待深入研究。

本研究以河南省某纤维素醚化工厂高COD难降解有机废水为处理对象,开展三级UASB耦联A/O工艺的启动试验研究,系统考察启动过程中各反应器的运行效能,调整启动策略与关键运行参数,以期为该组合工艺在处理高浓度难降解化工废水领域的工程应用提供参考。

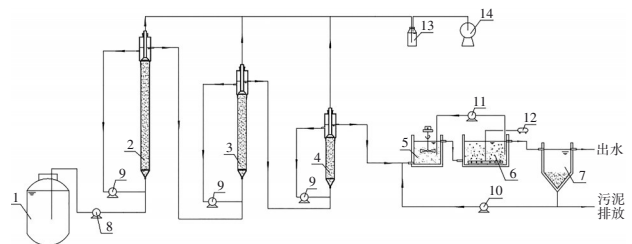
1 材料与方法

1.1 试验用水

试验用水为河南省某化工厂的生产废水,该企业主要生产羟乙基纤维素丙醚(HEC),生产过程中会伴随产生大量高COD高盐(主要为NaNO₃)废水。该废水经磁混凝沉淀+超滤+电渗析物化预处理后,将COD和NaNO₃有效分离,高COD部分废水水质指标如下:COD为45 000~46 000 mg/L、溶解性总固体(TDS)为750~1 000 mg/L、SS为0.01 mg/L、TN为191~531 mg/L、TP为0~5 mg/L、pH为6.8~9.0。

1.2 试验装置

试验采用三级UASB耦联A/O工艺处理高COD化工废水,整体工艺流程如图1所示。



1. 进水箱 2.UASB1 3.UASB2 4.UASB3 5. 缺氧池 6. 好氧池
7. 沉淀池 8. 进水泵 9. 循环泵 10. 污泥回流泵 11. 硝化液回流泵
12. 曝气泵 13. 水封瓶 14. 湿式气体流量计

图1 三级UASB耦联A/O工艺流程

Fig.1 Flow chart of three-stage UASB coupled with A/O process

三级UASB试验装置核心由3个尺寸不一、有机玻璃材质的单体UASB串联构成,分别记作UASB1、UASB2、UASB3,三者有效容积分别为1.47、0.98、0.49 L。配套设备有保温箱、进水箱、出水箱、加药水箱、进水泵、循环泵、加药泵、进水流量计、水封瓶、湿式流量计等。每一级UASB都配有外循环系统,保证废水基质与微生物充分混合。各级UASB均含有三相分离器。废水由左侧进水桶从底部进

入保温箱内的三级UASB装置,控制反应器内部温度为35℃,气体由上部气管收集测量。

A/O工艺试验装置由缺氧池、好氧池、沉淀池组成,三者有效容积分别为0.5、1.0、1.5L,材质均为有机玻璃,缺氧池内部装有搅拌器,好氧池内部设有曝气头。配有进水箱、出水箱、进水泵、硝化液回流泵、污泥回流泵、搅拌装置、曝气装置等。

1.3 接种污泥

三级UASB接种污泥取自附近某啤酒厂UASB厌氧颗粒污泥,污泥呈黑色,为均匀球状或椭球状,各级投加量为反应器有效容积的40%,MLSS和MLVSS分别为50.3~106.0g/L和40.4~88.7g/L。

A/O工艺接种污泥取自附近污水处理站A/A/O工艺曝气池,原污泥为褐色絮状悬浮液,MLSS、MLVSS分别为3270~3356、2320~2510mg/L,污泥容积指数(SVI)为73~80mL/g,经浓缩后投加,缺氧池和好氧池的投加量均为有效容积的50%。

1.4 试验方法

三级UASB的启动:分为驯化期、负荷提升期及满负荷期,采用梯度负荷驯化策略,通过低有机负荷(OLR)驯化,逐渐递增进水COD浓度及阶梯缩短水力停留时间(HRT)以促进功能微生物定向富集。碱液(NaHCO₃)投加量根据系统内部pH控制,磷、铁、钴、镍元素投加量根据微生物所需元素最低浓度计算。

A/O工艺的启动:在三级UASB反应器启动完成后进行,用三级UASB系统出水作为A/O工艺的进水,在室温20℃下,控制内回流比为100%~200%、污泥回流比为100%。启动过程采用增加进水COD浓度作为负荷提升手段,分为3个阶段:低负荷期(COD=300~500mg/L)、负荷提升期(COD=600~800mg/L)、稳定期(COD=1000~1050mg/L)。

1.5 测定项目及方法

COD采用重铬酸钾法测定,pH采用pH计测定,总碱度(TA)和挥发性脂肪酸(VFAs)采用联合滴定法测定,产气量采用湿式气体流量计测定,TN采用紫外分光光度法测定,NH₃-N采用纳氏试剂分光光度法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定。

COD相对去除率计算公式如下:

$$R_{0i} = \frac{COD_i^{in} - COD_i^{out}}{COD_0^{in} - COD_0^{out}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_{0i} 为第*i*级UASB的COD相对去除率,%;

COD_0^{in} 为反应器进水COD浓度,mg/L; COD_0^{out} 为反应器出水COD浓度,mg/L; COD_i^{in} 为第*i*级反应器进水COD浓度,mg/L; COD_i^{out} 为第*i*级反应器出水COD浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 三级UASB的启动

2.1.1 容积负荷及HRT的变化

整个启动历时319d,三级UASB系统的容积负荷及HRT变化如图2所示。驯化初期将系统HRT控制在45d,UASB1的容积负荷控制在2kgCOD/(m³·d)以下,提升幅度为0.13kgCOD/(m³·d),让厌氧颗粒污泥更好地适应进水水质。随着驯化过程的进行,HRT缩短,容积负荷不断提高,COD去除率也波动上升,驯化期结束时整体容积负荷为0.65kgCOD/(m³·d),HRT为15d,COD去除率为97.28%。当运行175d后(负荷提升期),系统逐渐适应水质,伴随有机负荷的不断提高,对COD的去除率波动明显减小。满负荷运行后(307d后),系统整体HRT为6.7d,平均容积负荷为6.5kgCOD/(m³·d),UASB1、UASB2、UASB3的容积负荷分别达到8.0、5.5、4.0kgCOD/(m³·d),COD去除率达到97.62%,运行效果良好。

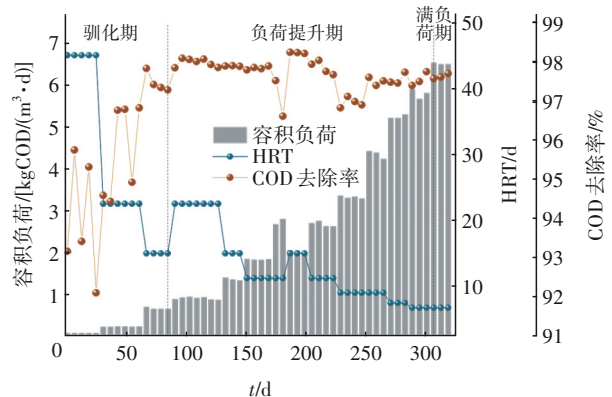


图2 三级UASB系统的容积负荷和HRT变化情况

Fig.2 Changes in volumetric loading and HRT of three-stage UASB system

2.1.2 进出水COD浓度变化及去除效果

三级UASB进出水COD浓度及总去除率的变化如图3所示。驯化初期系统对COD的平均去除率维持在94.72%,驯化末期时COD去除率达到97%以上,但系统在此期间不太稳定,COD去除率波动较大,主要归因于系统对这类纤维素醚生产废水不太适应。随着进水COD浓度不断提高,至启动后期,

污泥稳定性增加、活性上升,系统整体对COD的去除率逐渐稳定,保持在97%以上,平均出水COD为1 070 mg/L。

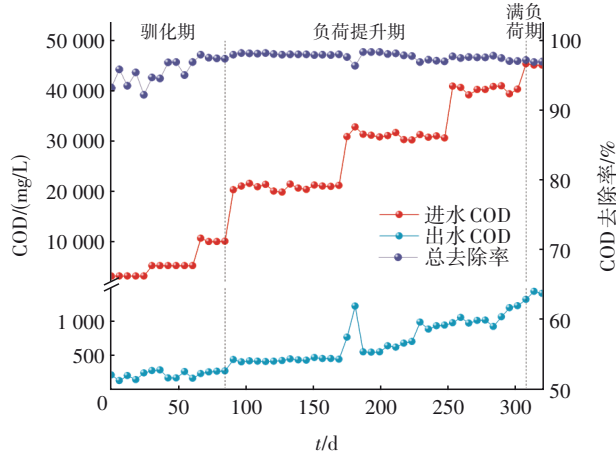


图3 三级UASB系统COD浓度及总去除率的变化

Fig.3 Changes in COD concentration and total removal rate of three-stage UASB system

各级UASB的COD相对去除率变化见图4。

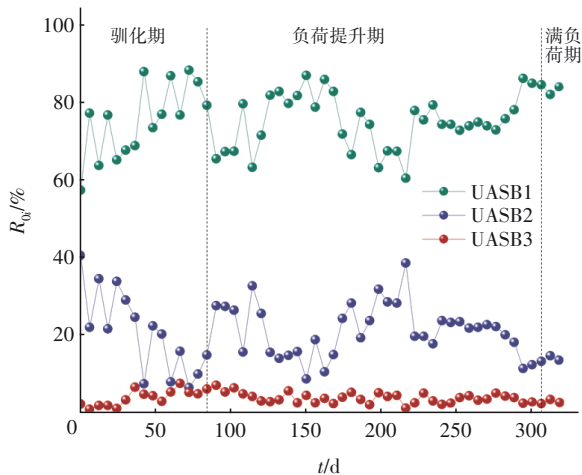


图4 各级UASB的COD相对去除率变化

Fig.4 Changes in relative removal rates of COD in each UASB

驯化期结束时,UASB1、UASB2、UASB3对COD的相对去除率分别为79.16%、14.80%、6.04%。在整个启动过程中,COD相对去除率为UASB1>UASB2>UASB3,UASB1的COD相对去除率平均值达到80%左右,远超过UASB2(13%)和UASB3(3%)。这是由于经物化处理后的纤维素醚生产废水中的COD大部分为可溶性易降解COD,B/C为0.57,易被厌氧菌降解,并且UASB1的接种污泥量是该工艺中最高的,因此UASB1内部保持了较高的

产甲烷菌活性以及丰富多样的互营微生物群体,显著增强了其降解有机有害物质的效率。虽然后端UASB的COD相对去除率较低,但是在一定程度上起到了稳定水质的作用。

2.1.3 进出水pH的变化

各级UASB的pH变化如图5所示。启动初期(驯化期),UASB1出水pH变化幅度较大,主要是因为废水中缺乏中和VFAs的缓冲物质,进水pH能够很大程度上影响UASB1内部的pH。特别是在处理富含有机碳源且缓冲能力较弱的废水时,系统调试阶段必须考虑碱性调节剂的补充投加,以防因酸性物质积累造成pH急剧下降,进而导致整个生化处理流程无法正常启动运行^[7]。向UASB1内间断投加碱液以缓解pH波动,防止酸化。UASB2和UASB3在运行13 d后出水pH保持在7.45以上,由此可知,三级UASB启动过程中对于pH的控制主要针对UASB1即可,UASB2和UASB3由于进水来自前一级,带有碱度,受原水pH影响较小。

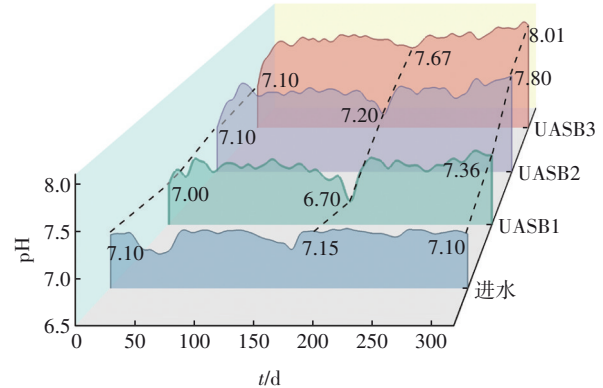


图5 三级UASB的pH变化

Fig.5 Changes in pH of three-stage UASB

在负荷提升期,由于进水负荷过高,没有足够碱度中和UASB1内部所产生的有机酸,VFAs出现累积,产甲烷菌活性下降,出水pH降至6.70,反应器发生酸化,UASB2、UASB3的pH也相应降低,但仍能维持产甲烷菌生长所需的pH,所受影响较小,系统整体的COD去除率降至96.60%。在UASB1内投加碱液后,pH逐渐升高,COD去除率得以恢复。启动后期(满负荷期),UASB1、UASB2、UASB3的pH分别稳定保持在7.2~7.4、7.5~7.8、7.8~8.1。通常认为厌氧器中的最适宜pH为7.0~7.5,但在本试验中UASB2和UASB3的pH超过该适宜范围时产甲烷菌仍能保持足够活性。

纵观整个启动过程可以发现,系统中的pH表现为UASB1<UASB2<UASB3。赵明星等^[8]采用两级连续厌氧系统(UASB)处理糖蜜酒精废水时发现,第一级UASB较第二级UASB出水pH低(分别为8.40与9.02)时,COD总去除率为70%左右,高于单级UASB,表明多级UASB系统的pH分离并不会影响产甲烷菌活性甚至可能有促进作用,即便超出适宜范围仍能保持良好的处理效果。

2.1.4 出水TA及VFAs的变化

出水TA及VFAs的变化如图6所示。可以看出,在驯化初期,各级UASB出水VFAs和TA浓度均呈上升趋势,这是由于试验初期系统内没有足够的碱度对积累的VFAs进行缓冲,但启动过程中VFAs的积累量并非会无限制地升高,当内部有足够的碱度时,VFAs会趋于稳定。驯化初期,UASB3出水TA浓度会高于UASB1和UASB2,这是由于反应器内高HRT驯化,UASB3中由进水高浓度有机物转化产生的VFAs并不多,对碱度的消耗量较小。随着运行时间的推移,UASB3中的TA浓度逐渐下降。运行过程中,由于VFAs积累量与反应器负荷提升紧密相关,在负荷提升阶段,UASB1在面对较高负荷进水时,呈现出较高的VFAs积累量,在175~181 d时发生酸化。贺延龄^[9]认为VFAs在较低pH下对产甲烷菌的毒性是可逆的。在系统逐渐恢复活力时,UASB1的出水VFAs浓度降至5.52 mmol/L(以CH₃COOH计为331.2 mg/L),虽较酸化之前VFAs积累量有所增高,但VFAs对产甲烷菌的影响取决于pH,只有在pH较低时,非离子化的VFAs比例太高才会影响产甲烷菌对COD的去除,测定此时出水VFAs/TA为0.26,进而可以判定系统不再酸化,无需再通过投加碱液来进行调整。

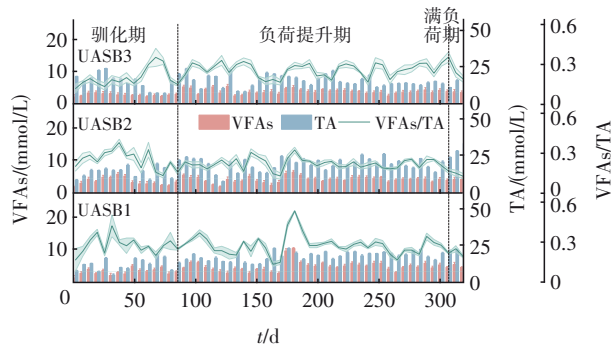


图6 TA和VFAs的变化

Fig.6 Changes in TA and VFAs

在满负荷稳定运行时(319 d),各级UASB出水VFAs浓度逐渐下降,处于安全浓度范围之内,分别为4.17、3.67、3.17 mmol/L(以CH₃COOH计分别为250.2、220.2、190.2 mg/L),对应的TA浓度分别为23.17、33.36、18.65 mmol/L(以CaCO₃计分别为1158.5、1668.0、932.0 mg/L),各级UASB的VFAs/TA分别为0.18、0.11、0.17,且发现UASB3的VFAs平均积累量略低于UASB1和UASB2,说明系统经过长时间的驯化,已具备了一定的缓冲能力,系统自身能够维持酸碱平衡,保持系统稳定的同时具有较高的COD去除率。

2.1.5 产气量的变化

三级UASB系统的产气量变化如图7所示。可知,随着启动过程的进行,产气量总体呈现上升趋势,反映出产甲烷菌的适应能力显著强化,对经预处理后的高COD纤维素醚生产废水的适应性逐渐加强。在启动初期,产气量上升趋势并不明显,进入负荷提升阶段后,产气量显著升高,各级UASB反应器内都能看到明显的小气泡,单位容积产气率明显上升。在175~181 d期间,整体产气率下降,受反应器酸化的影响巨大,UASB1停止产小气泡,通过加碱调整反应器内部pH,继续运行至187 d,三级UASB的单位容积产气率开始回升。在满负荷运行阶段,反应器整体运行良好,产气率较为稳定,此时平均产气率可达到2.28 L/(L·d),单位有机物的产气量可达到349.82 mL/gCOD,底物转化程度高,产气效果理想。多级厌氧反应器无论从产气量还是产气稳定程度都会优于单级厌氧反应器^[10]。

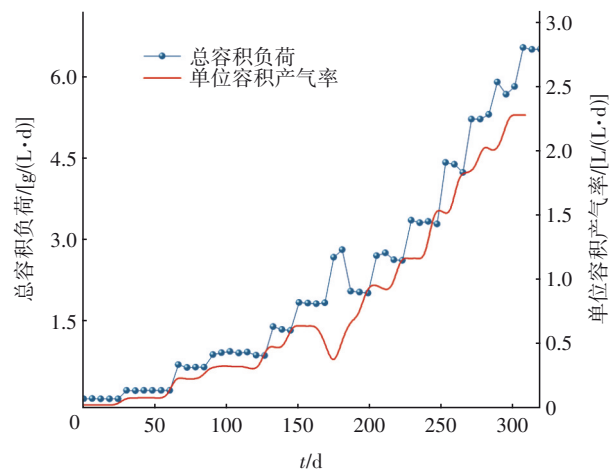


图7 三级UASB的产气量变化

Fig.7 Change in gas production of three-stage UASB

2.2 A/O工艺的启动

2.2.1 COD去除情况

A/O工艺历经61 d完成启动,出水COD为156 mg/L,去除率达到84.81%,具体如图8所示。根据进水COD浓度上升梯度(300、500、600、800 mg/L),启动结束时进水浓度稳定在1 000~1 050 mg/L。在启动前期,A/O系统对COD的去除率并不高,为45.36%,闷曝结束后COD去除率仅为40.52%,观察到好氧池水面有絮状物漂浮,池体内部污泥呈云朵状,对O池的DO浓度进行检测发现为5 mg/L。有研究认为,曝气池中的DO应控制在2~4 mg/L,过量曝气会导致活性污泥絮体解体,发生污泥老化问题,致使污泥中的有机质进入到出水中,影响出水效果^[11]。经过调整后,将曝气池内的DO控制在1~2 mg/L,重新在O池补泥后,系统的污泥沉降性有所改善,SV₃₀恢复为27%。当进水量调整为设计流量时(第19天),可以看到COD去除率下降明显,可见HRT的缩短对反应器内的污泥有一定冲击。随着启动过程的进行,A/O工艺对COD的去除率逐渐稳定,效果良好,最终达到80%以上。

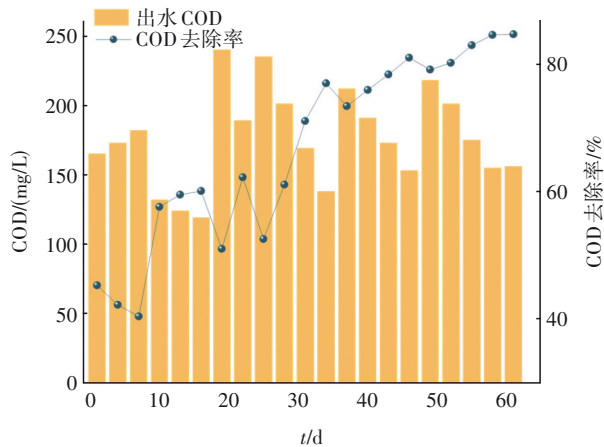


图8 A/O工艺对COD的去除效果

Fig.8 COD removal effect in A/O process

2.2.2 氮去除情况

A/O池启动过程中出水氨氮与总氮的动态变化如图9所示。可以看出,启动初期由于活性污泥的解体,生物絮体影响出水水质,调整后系统对总氮的去除能力逐渐变强,当进水总氮浓度提高到31 mg/L时(第16天),出水总氮为11.49 mg/L,系统对总氮的去除率为62.94%。总氮的去除主要与缺氧池的反硝化脱氮有关,当提高硝化液内回流比至200%时(第25天),出水总氮为28.50 mg/L,去除率

达到50.87%。大部分反硝化菌的营养类型属于化能异养型,传统意义上总氮的脱除要经过硝化和反硝化作用,A/O工艺硝化液回流比通过调控反硝化反应进程,成为总氮去除效能的关键控制因子^[12]。当内回流比为100%时,A池中的底物是脱氮的主要限制因素,营养物质缺乏,活性低。提高内回流比后,A池中的反硝化菌受底物影响减小,系统的脱氮效果增强。但是过高的内回流比会破坏A池的厌氧环境,影响微生物活性^[13]。启动后期逐渐提高进水比例,最终对总氮的去除率达到78.82%,出水总氮为20.54 mg/L,满足出水水质要求。

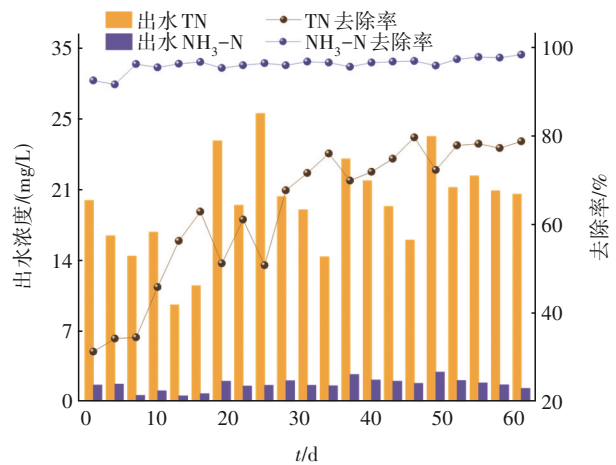


图9 A/O工艺对TN、NH₃-N的去除效果

Fig.9 TN and NH₃-N removal effect in A/O process

启动初期,进水氨氮为22.33 mg/L,随着污泥的培养驯化,从图9可以看出A/O系统对氨氮的去除效果良好,平均去除率在90%以上。氨氮的去除主要由氨氧化菌与亚硝酸氧化菌完成,此类硝化细菌属于好氧自养型细菌,以大气中的二氧化碳或环境中的碳酸盐为碳源满足自身生命活动,故进水有机物浓度对此类细菌的影响较小,系统对氨氮具有良好且稳定的去除效果。在第61天,系统出水氨氮为1.31 mg/L,去除率为98.39%。

2.2.3 磷去除情况

A/O池启动期间对总磷的去除情况如图10所示。可以看出,启动初期A/O工艺对总磷的去除率并不高,维持在48.36%~52.05%,出水总磷为1.05~1.10 mg/L。这主要是由出水夹杂污泥所致。造成此种恶化的原因可能是过度曝气导致短时间系统内有机负荷降低。也有人证明过度曝气会引起胞内PHB(聚羟基丁酸基丁酸酯)减少,限制PAOs(聚

磷菌,包含反硝化聚磷菌)对磷的吸收^[14]。因此,磷不能被完全摄取导致暂时性的生物除磷效率降低。调整后,系统对总磷的去除率有所提高。随着启动的进行,在第16天后,系统对总磷的去除率开始下降,这是由于系统中PAOs对磷的吸收已经趋近于饱和,系统没有排泥,老化解体的菌种细胞裂解,从而使系统出水总磷升高。第34天后,试验中进行适量排泥,保持污泥龄(SRT)在12.5 d左右,系统对总磷的去除能力逐渐增强。至第61天,A/O工艺出水总磷保持在1.39 mg/L,总磷去除率达到77.38%,满足出水水质要求,除磷效果良好。

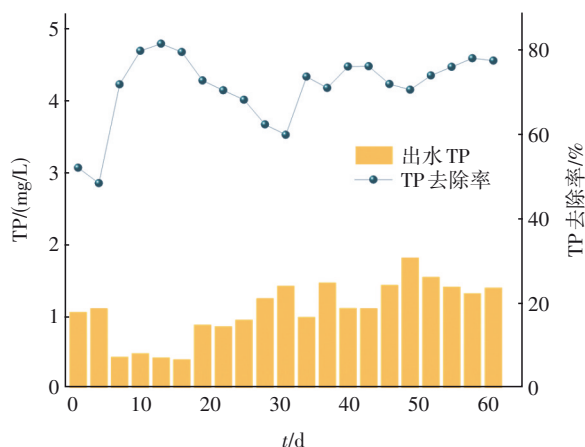


图10 A/O工艺对总磷的去除效果

Fig.10 TP removal effect in A/O process

3 结论

① 针对经物化预处理的高COD纤维素醚生产废水,三级UASB小试装置的启动历时319 d,满负荷运行时,系统相对稳定,各级UASB反应器的容积负荷分别达到8.0、5.5、4.0 kgCOD/(m³·d),COD去除率达到97%以上,平均出水COD为1 070 mg/L,各级UASB的COD相对去除率呈现递减趋势,三级UASB的COD总去除率稳定水平明显高于单级UASB,pH表现为UASB1<UASB2<UASB3;各级UASB的VFAs/TA均小于0.3,平均产气率可达到2.28 L/(L·d)。

② A/O工艺的启动历时61 d,成功启动后,在室温20℃、内回流比为200%、污泥回流比为100%、SRT为12.5 d条件下稳定运行,出水COD、NH₃-N、TN、TP分别为156、1.31、20.54、1.39 mg/L,达到了河南省《化工行业水污染物间接排放标准》(DB41/1135—2016)和园区污水处理厂收水标准。

参考文献:

- [1] 张新政,范煜秦,薛意,等.厌氧膜生物反应器处理酰胺工业废水的碳中和潜力:能源回收与碳减排[J].环境工程学报,2024,18(9):2637-2646.
ZHANG X Z, FAN Y Q, XUE Y, et al. Carbon-neutral potential in treatment of amide-containing industrial wastewater by anaerobic membrane bioreactor (AnMBR): energy recovery and carbon emission reduction [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(9): 2637-2646 (in Chinese).
- [2] 张凯钧,郭勤,谢华明,等.江西某生活垃圾焚烧发电厂渗滤液处理工程实践[J].水处理技术,2024,50(6):144-147,152.
ZHANG K J, GUO Q, XIE H M, et al. Practice of leachate treatment engineering of a domestic waste incineration power plant in Jiangxi Province [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(6): 144-147, 152 (in Chinese).
- [3] DA SILVA F C G, DE SOUZA ALMEIDA P, DE MENEZES C A, et al. Anaerobic digestion of the liquid fraction of fruit and vegetable waste: two-stage versus single-stage process [J]. ACS Omega, 2025, 10(22): 22847-22857.
- [4] 崔兵,陈李庆,甄小青,等.废润滑油再生废水处理工程调试及运行研究[J].中国给水排水,2024,40(6):132-136.
CUI B, CHEN L Q, ZHEN X Q, et al. Commissioning and operation of waste lubricating oil reclaimed wastewater treatment project [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(6): 132-136 (in Chinese).
- [5] 盘爱享,房桂干,田庆文,等.慈竹高得率制浆废水好氧降解性能研究[J].工业水处理,2023,43(3):166-171.
PAN A X, FANG G G, TIAN Q W, et al. Study on aerobic degradation characteristic of high yield pulping wastewater of *Neosinocalamus affinis* [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(3): 166-171 (in Chinese).
- [6] 刘昌莘,韩响身,陈浩,等.高盐废水体系运行模式对活性污泥颗粒化过程的影响[J].环境工程学报,2024,18(1):209-219.
LIU C X, HAN Y S, CHEN H, et al. Effect of operation modes on granulation process of activated sludge in treatment of hypersaline wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(1): 209-219 (in Chinese).
- [7] 努热曼古丽·图尔荪,韦良焕,林宁,等.热碱预处理

- 新疆特色餐厨垃圾厌氧共消化研究[J]. 环境污染与防治, 2025, 47(5): 58-64.
- NUREMANGULI T, WEI L H, LIN N, et al. Study on anaerobic co-digestion of Xinjiang specialty kitchen waste treated with hot alkali pretreatment [J]. Environmental Pollution & Control, 2025, 47(5): 58-64 (in Chinese).
- [8] 赵明星, 陈阳, 施万胜, 等. 纳米零价铁对糖蜜酒精废水两级厌氧处理的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 70-74.
- ZHAO M X, CHEN Y, SHI W S, et al. Effect of nano zero valent iron on treatment of molasses alcohol wastewater by a two-stage anaerobic digestion system [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(21): 70-74 (in Chinese).
- [9] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
- HE Y L. Anaerobic Biological Treatment of Wastewater [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998 (in Chinese).
- [10] DANGOL S, GHIMIRE A, TULADHAR S, et al. Biohythane and organic acid production from food waste by two-stage anaerobic digestion: a review within biorefinery framework [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(12): 12791-12824.
- [11] 唐霞, 李江鹏, 申云, 等. 基于A²O—MBBR工艺的污水厂提标改造中试研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(11): 52-57.
- TANG X, LI J P, SHEN Y, et al. A pilot test on upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plant based on A²O—MBBR process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(11): 52-57 (in Chinese).
- [12] 柏春荫, 万成仁, 黄尉, 等. MSBR+高效沉淀池组合工艺在高排放标准下污水厂的应用[J]. 水处理技术, 2024, 50(1): 147-151, 156.
- BO C Y, WAN C R, HUANG Y, et al. Application of MSBR+high efficiency sedimentation tank process in wastewater treatment plant with stringent discharge standard [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(1): 147-151, 156 (in Chinese).
- [13] 李溯, 张永梅, 邬浩, 等. 总氮前置调控方法在污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2024, 40(20): 89-94.
- LI S, ZHANG Y M, WU H, et al. Application of total nitrogen pre-regulation method in a WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(20): 89-94 (in Chinese).
- [14] 毕贞, 钱萌萌, 袁艺娜, 等. GAOs丰度变化对聚磷生物膜系统的影响: 磷富集性能及代谢特征为例[J]. 中国环境科学, 2025, 45(3): 1601-1611.
- BI Z, QIAN M M, YUAN Y N, et al. Effects of GAOs abundance to the systematic phosphorus enrichment performance and the metabolic characteristics in phosphorus-accumulating biofilm [J]. China Environmental Science, 2025, 45(3): 1601-1611 (in Chinese).

作者简介: 郑斐州(1999—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 研究方向为工业废水处理。

E-mail: zjz10222021@163.com

收稿日期: 2025-07-08

修回日期: 2025-07-19

(编辑: 刘贵春)

综合运用自然恢复和人工修复,
持之以恒推进生态建设