

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.017

UASB处理高含固污泥热水解滤液启动特性

连洁^{1,2}, 卓杨¹, 杨培真¹, 田国兴¹, 齐泽宁³, 韩芸¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西西安710055; 2. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司, 陕西西安710043; 3. 西安益维普泰环保股份有限公司, 陕西西安710077)

摘要: 针对高含固剩余污泥热水解滤液采用UASB处理的启动特性, 开展连续运行试验(HRT为26~7.8 d)并分析启动过程中有机物去除率、甲烷产量的变化。结果表明, COD去除率及甲烷产率随着有机负荷的提升而增加, 当HRT为7.8 d时COD去除率可达(65.92±2.44)%。相比于COD去除率, 系统启动过程中更应关注甲烷产量的变化。当HRT为7.8 d时, 出水氨氮浓度及pH分别为(2 532.37±129.93) mg/L、8.02±0.28。负荷提升过程中, 应更注重氨抑制风险。由于沼气产量及进水量较低, 系统启动初期可采用间歇进水并增设内回流的方式增加UASB内的上升流速。

关键词: UASB; 高含固剩余污泥; 热水解滤液; 有机负荷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0114-07

Start-up of UASB for Treating Thermal Hydrolyzed Filtrate of Excess Sludge with High Solid Content

LIAN Jie^{1,2}, ZHUO Yang¹, YANG Pei-zhen¹, TIAN Guo-xing¹, QI Ze-ning³, HAN Yun¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Engineering Investigation & Design Research Institute of China National Nonferrous Metals Industry Co. Ltd., Xi'an 710043, China; 3. Xi'an Yiwei Putai Environmental Protection Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: To investigate the start-up characteristics of UASB for treating thermal hydrolyzed filtrate of excess sludge with high solid content, a continuous running test (HRT ranging from 26 days to 7.8 days) was carried out and the changes of organic matter removal rate and methane yield during the start-up process were analyzed. The COD removal rate and methane yield rate increased with the organic loading rate. When the HRT was 7.8 days, the COD removal rate reached (65.92±2.44)%. Compared with COD removal rate, more attention should be paid to the change of methane yield during system start-up. When the HRT was 7.8 days, the effluent ammonia nitrogen and pH were (2 532.37±129.93) mg/L and 8.02±0.28, respectively. In the process of load increase, more attention should be paid to the risk of ammonia inhibition. Due to the low biogas yield and influent volume, intermittent feeding and internal reflux can be adopted to increase the up-flow velocity in UASB at the initial start-up stage.

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52070153); 陕西省重点研发计划一般项目(2020SF-357)

通信作者: 韩芸 E-mail: hanyun@xauat.edu.cn

Key words: UASB; excess sludge with high solid content; thermal hydrolyzed filtrate; organic loading rate

随着我国污水产量的逐渐上升,城市污水处理厂污泥产量也持续增加。厌氧消化不仅可缓解能源紧缺,同时可降低环境污染,已广泛应用于城市污水厂污泥的处理^[1],但存在生物转化效率低等问题^[2]。我国目前污泥产量及其处理能力存在极大差距,热水解技术的发展和应用的突破高含固污泥厌氧消化(含固率>10%)速率低的瓶颈^[3-5],高含固污泥热水解-厌氧消化工艺成为污水厂污泥厌氧处理系统升级改造的可选工艺之一^[6]。

热水解可有效释放胞内水分,并用于改善污泥脱水性能,在后续研究中,污泥热水解可改善高含固污泥流态并提升厌氧消化效率^[7]。近期研究表明,热水解实现了污泥中有机物的相分离,即热水解后污泥中大部分可被甲烷化的有机物转移至液相,热水解滤液具有极高的甲烷化潜力^[8-9]。从理论角度分析,若采用UASB等高效厌氧处理方法对污泥热水解滤液进行厌氧处理,会大幅降低污泥厌氧处理建设及运行费用。

高含固污泥热水解滤液具有高有机物、高氮特点^[10]。热水解滤液厌氧消化的pH及氨氮浓度会维持在较高水平,存在一定的氨抑制风险。同时,启动过程中由于热水解滤液有机物浓度较高、启动有机负荷较低,UASB内气体及液体上升流速不足。而目前国内外对热水解滤液采用UASB进行处理的启动特性探究较少。因此,笔者采用UASB处理热水解滤液,在分析进出水水质变化的基础上,探讨高含固污泥热水解滤液的厌氧处理特性及启动过程中存在的问题,为实现高效、低成本污泥处理提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 高含固污泥热水解滤液来源及其水质指标

试验污泥为西安市某污水处理厂剩余污泥,该污水处理厂采用A²O工艺。剩余污泥脱水至含固率为10%,经过165℃、30 min热水解后(高压反应釜)离心脱水(4 000 r/min、10 min、4℃)。取上清液作为热水解滤液,于(4±1)℃贮存待用。对热水解滤液水质情况进行测定,其结果如下:pH为5.61±0.06,COD浓度为(36.41±1.85)g/L,氨氮浓度为

(0.77±0.11)g/L,磷酸盐浓度为(0.74±0.08)g/L,总氮浓度为(3.31±0.08)g/L,总磷浓度为(0.80±0.01)g/L,蛋白质浓度为(19.95±0.31)g/L,碳水化合物浓度为(8.00±1.54)g/L。

1.2 试验装置

UASB系统由反应器、进水泵、气体流量计、恒温水浴循环箱等组成,如图1所示。其中反应器由有机玻璃制成,高度为110 cm,内径为7.5 cm,有效容积为3.5 L,内部设置三相分离器,恒温水浴循环系统将反应器温度控制在(35±1)℃。沼气采用湿式气体流量计计量,进水采用蠕动泵控制。

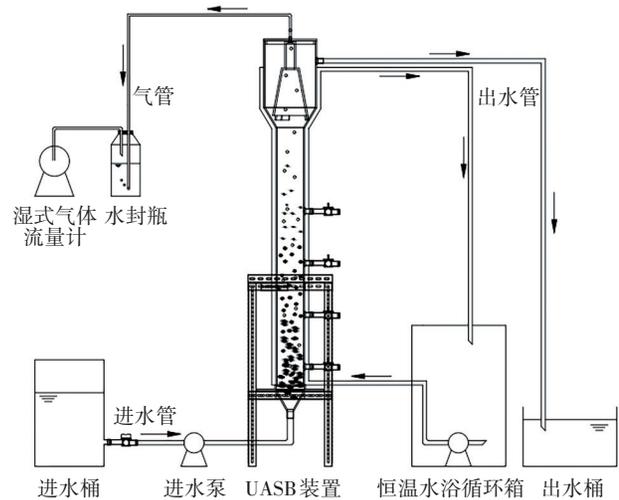


图1 UASB系统示意

Fig.1 Schematic diagram of UASB system

1.3 系统启动方式及运行参数

UASB接种污泥取自西安市某啤酒厂UASB反应器,其TS为104.66 g/L、SS为99.06 g/L、VSS为33.45 g/L。接种污泥与无氧水混合后,充入反应器容积的1/2,随后注入滤液,直至12 d后无气体产生,开始启动UASB。

在维持热水解滤液COD浓度稳定的基础上,逐渐降低水力停留时间(HRT),以提高系统负荷的方式启动UASB。根据运行方式的不同,启动阶段分为第1阶段和第2阶段,见表1。第1阶段:间歇式运行+回流阶段,在HRT为26 d和13 d时,由于进水量较少,针对该阶段上升流速及气体产量较低的问题,采用间歇式进水及回流以改善UASB内的上升

流速。第2阶段:连续运行阶段,在HRT为7.8 d时,由于上升流速及气体产量较高,因此可采用连续进水方式运行。

表1 UASB启动阶段运行参数

Tab.1 Operating parameters of UASB start-up stage

启动阶段	第1阶段		第2阶段
HRT/d	26	13	7.8
有机负荷/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	1.40	2.87	4.56
进水量/(mL·d ⁻¹)	134	268	447
进水方式	间歇式	间歇式	连续进水
运行方式	间歇式运行+回流	间歇式运行+回流	连续运行

1.4 测定项目及方法

pH采用pH计测定;COD采用标准重铬酸钾法测定;NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定;TS、SS、VSS采用标准重量法测定;沼气中气体组分采用气相色谱仪测定,使用TCD热导检测器,TDX-01填充柱,测定条件为进样口温度100℃、柱箱温度150℃、检测器温度160℃。

2 结果与讨论

2.1 启动阶段COD的变化

为了探讨UASB在启动过程对热水解滤液中有有机物去除率的变化,测定进出水COD浓度并计算去除率,结果如图2所示。

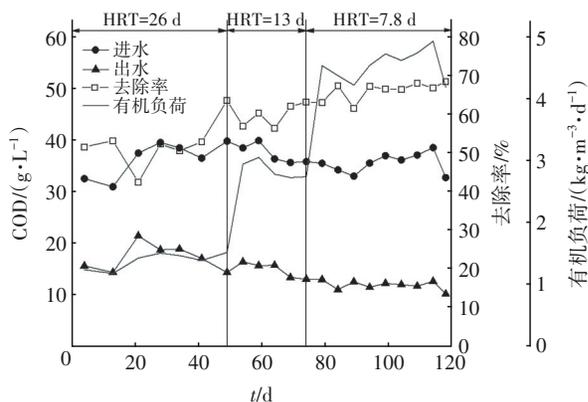


图2 UASB启动阶段COD的变化

Fig.2 Change of COD during UASB start-up stage

由图2可以看出,进水COD浓度为(36.45±2.44) g/L,当HRT为26、13、7.8 d时,COD去除率分别为(52.53±6.17)%、(59.93±3.00)%及(65.92±2.44)%。在反应器启动时,由于UASB中厌氧污泥

未适应热水解滤液,维持HRT为26和13 d直至COD去除率增至60%以上。当HRT为7.8 d时,UASB的有机负荷上升及进水量增加。李俊生等^[11]采用中温UASB处理精对苯二甲酸(PTA)废水,启动初期也通过内回流增加进水和底部污泥的充分接触,去除系统中的细小和老旧污泥。本系统运行方式由间歇进水+内回流调整为连续进水,此时COD去除率仍维持在60%以上,且在稳定一段时间后COD去除率可达到65%以上。因此,随着有机负荷的提升,COD去除率进一步增加,说明在UASB启动阶段厌氧污泥驯化良好。

启动阶段,UASB有机负荷在HRT为26、13、7.8 d时分别为(1.40±0.07)、(2.87±0.07)及(4.56±0.10) kg/(m³·d)。Qiao等^[12]采用中试EGSB处理城市污水厂污泥热水解滤液(COD约为24.0 g/L),其有机负荷由第1阶段的2.0~8.0 kg/(m³·d)逐渐提升至第4阶段的11.0 kg/(m³·d),该阶段COD去除率约为63%。郑俊等^[13]采用EGSB处理焦化废水(COD为2 650~2 900 mg/L),当进水负荷增至2.66 kg/(m³·d)时,COD去除率逐渐增加并稳定在34%左右。对比先前的研究结果,本试验UASB在有机负荷为(4.56±0.10) kg/(m³·d)阶段运行稳定后(90 d后),COD去除率可达(67.22±0.75)%,认为UASB处理热水解滤液启动成功。

2.2 启动阶段反应器产气量的变化

在厌氧处理过程中,产气量可直观反映有机物分解效率的变化。为了探讨UASB启动过程中产气情况,记录日沼气产量,测定气体组分,结果见图3。

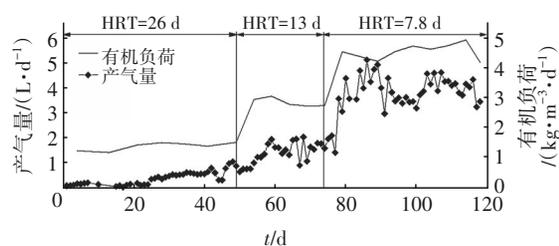


图3 UASB启动阶段产气量的变化

Fig.3 Change of biogas yields during UASB start-up stage

由图3可知,UASB产气量随着有机负荷的增加而增加,当HRT为26、13、7.8 d时,产气量分别为0.41、1.42、3.81 L/d。在负荷增加初期,产气量会出现波动,这是由于负荷提升对UASB厌氧系统产生冲击。经短暂时间的适应和调整,反应器的产气性能快速恢复,说明反应器内产甲烷菌群具有较好

的活性。甲烷含量比产气量更敏感,可以反映反应器的即时状态^[14]。测定沼气中甲烷含量发现,启动初期气体组分中甲烷含量较高,在76.86%~81.69%之间,当平均有机负荷升至4.56 kg/(m³·d)时,产气中甲烷含量下降至64.26%~66.81%。

为了进一步分析UASB处理热水解滤液的产甲烷性能,计算理论甲烷产率并对比实际甲烷产率,结果如图4所示。可知,当HRT为26、13、7.8 d时,产甲烷量分别为(0.31±0.21)、(1.12±0.33)、(2.49±0.13) L/d,经计算甲烷产率为64、112、157 mL/gCOD_{投加},启动过程中微生物对热水解滤液中有有机物甲烷化的性能逐渐提高。

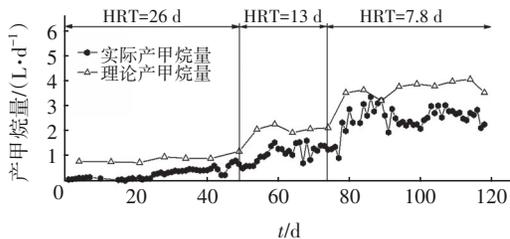


图4 UASB启动阶段产甲烷量的变化

Fig.4 Change of methane yields during UASB start-up stage

2.3 启动阶段氨氮的变化

出水氨氮浓度不仅可表征污泥中有机物的分解情况,也是UASB中缓冲体系的重要组成部分。为了探讨启动阶段污泥中氨氮的生成特性,对启动阶段进出水氨氮浓度变化进行测定,结果如图5所示。可以看出,启动阶段热水解滤液氨氮浓度为(701.40±185.77) mg/L,启动初期出水氨氮浓度上升至1773.85~2066.38 mg/L。随着UASB中厌氧颗粒污泥对热水解滤液中蛋白质分解效率的增加,出水氨氮浓度进一步升高,当HRT为26、13、7.8 d时分别为(2259.06±134.40)、(2449.73±167.40)、(2532.37±129.93) mg/L,低于研究报道的高含固污泥中温厌氧消化氨氮抑制浓度(3000~4000 mg/L)^[15]。进一步计算出水游离氨浓度^[16],当HRT为26、13、7.8 d时分别为167.49、206.61、339.02 mg/L,低于研究所报道的高含固污泥中温厌氧消化游离氨显著抑制阈值(600~800 mg/L)^[17]。由于污泥中有机物的主要组分为蛋白质^[18],在有机物被大量转化为甲烷及二氧化碳的同时,氨基酸水解产生的氨氮会进一步提升UASB中的氨氮浓度。因此,在以高含固污泥热水解滤液为处理对象时,UASB中氨氮浓度

的上升一方面可有效增加缓冲性能,另一方面也增加了氨抑制的风险。

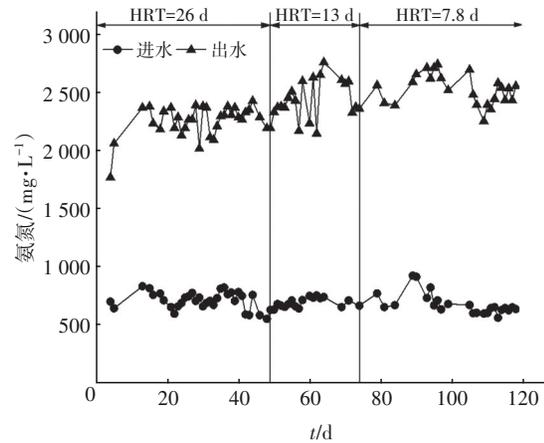


图5 UASB启动阶段进出水氨氮浓度的变化

Fig.5 Change of NH₄⁺-N concentrations of influent and effluent during UASB start-up stage

2.4 启动阶段pH的变化

pH不仅影响厌氧消化过程中微生物的活性、甲烷浓度等,还反映了消化过程中酸度与碱度的变化。UASB启动阶段pH的变化如图6所示。

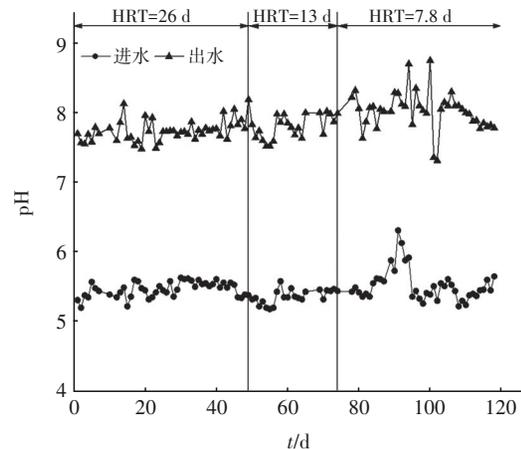


图6 UASB启动阶段pH的变化

Fig.6 Change of pH during UASB start-up stage

由图6可知,进水pH为5.61±0.06,当HRT为26、13、7.8 d时,出水pH分别为7.74±0.16、7.80±0.17、8.02±0.28,pH随着启动阶段负荷的增加而增加。pH的增加说明UASB系统中有机酸含量下降和氨氮浓度上升,这是由于滤液中含有的有机酸在产甲烷阶段转化为甲烷和二氧化碳,且含氮有机物的水解会增加厌氧处理系统的碱度。UASB的pH均处于较高的水平,较常规含固率污泥厌氧消化,高含固污泥热水解-UASB处理的pH约为8.0。启

动过程中出水pH逐渐上升,说明UASB中微生物活性增加,出水中酸度随着负荷的增加而降低。

3 讨论

3.1 UASB处理热水解滤液的启动特性

热水解滤液作为高含固污泥热水解产物,具有高有机物、高氮、高磷含量以及水质呈酸性等特点^[19]。UASB处理热水解滤液的初期启动阶段(HRT为26 d)出现厌氧微生物对热水解滤液未完全适应导致处理效率下降、沼气产量及上升流速不足、氨氮及pH升高等现象。

启动初期UASB的甲烷产率较低,仅为64 mL/gCOD_{投加}。韩芸等^[9]对30 mL含固率为10%的污泥热水解滤液(165 °C、50 min)进行生物化学甲烷势测定,其COD为42.6 g/L、甲烷产量为305.0 mL、甲烷产率为238.7 mL/gCOD_{投加}。李彬彬等^[20]研究厌氧污泥对有机物的去除作用时发现,初期的去除主要依靠吸附作用,达到吸附极限时对COD的去除依靠水解酸化及厌氧生物降解。说明该UASB反应器在低负荷运行初期,厌氧污泥对有机物的去除基本依靠吸附和水解酸化作用。因此,在UASB处理热水解滤液启动初期,应保持较低的COD有机负荷,直至甲烷产率增至较高水平再进一步提升负荷。

由于启动阶段甲烷菌活性较低,热水解滤液pH较低(5.61±0.06),且易于产酸,因此在启动阶段存在酸化的可能性。在常规含固率污泥厌氧消化启动过程中易出现酸化,而对于高含固率污泥厌氧消化,由于热水解滤液在消化过程中较易生成氨氮,UASB可维持较好的缓冲性能。因此,在UASB启动过程中,有机负荷的增加对出水氨氮浓度的影响较小,且pH可维持在较高范围。产甲烷菌生长的最佳pH范围为6.5~8.2^[21],pH及氨氮浓度增加将导致游离氨浓度上升。相对于有机负荷提升导致的酸积累,更需注意启动过程中的氨抑制。

3.2 存在的问题及解决方法

热水解滤液有机物含量较高,因此UASB在处理热水解滤液的启动阶段有机负荷较低,出现的问题及解决方法如下:

① 上升流速不足

启动阶段UASB中的上升流速及沼气产量在HRT为26、13 d阶段均较低,为了进一步改善反应器的运行效果,在该阶段UASB以间歇式运行并增

加内回流来提升上升流速,同时强化反应器内的混合效果。刘阳春等^[22]采用在UASB三相分离器下方设混合液回流口处理冲厕水,对COD的平均去除率达到75%。余亚琴等^[23]采用出水回流UASB处理太湖富藻水,有机负荷提高至3 kg/(m³·d),COD去除率可以稳定在75%左右。因此,UASB在启动阶段可采用间歇式进水并增加内回流方式促进厌氧污泥适应热水解滤液,同时提升其活性。

② 气泡及泡沫

启动初期,可观察到反应器中产生细微的少量气泡黏附于外壁,同时三相分离器出水液面出现泡沫。这可能是由于沼气产量低、上升流速不足且存在一定的边壁效应导致的。该现象将随着有机负荷的增加而得到有效缓解,或采用内回流方式增加液体上升流速来消除。

③ 氨氮浓度较高

由于污泥热水解滤液经充分厌氧消化后会产生大量氨氮,因此在处理过程中需注意出水氨氮及pH的变化。由于污泥在热水解过程中会产生一定浓度的氨氮,因此可采用出水回流稀释、蒸氨或氨吹脱的方式去除部分氨氮^[24],降低UASB中的氨抑制风险。热水解滤液经UASB处理后氨氮浓度较高,而COD浓度相对较低。若采用传统硝化-反硝化方式脱氮将存在碳源不足的问题,而采用厌氧氨氧化进行脱氮无需碳源^[25],因此可考虑采用厌氧氨氧化处理UASB出水。由于污泥在热水解及厌氧消化过程中会生成大量磷酸盐,也可考虑采用鸟粪石结晶法对UASB出水进行脱氮除磷^[26]。

4 结论

① 在UASB启动阶段,COD去除率及甲烷产率随着有机负荷的提升而增加,在HRT为7.8 d时,COD去除率可达(65.92±2.44)%、甲烷产率可达157 mL/gCOD_{投加}。相比于COD去除率,UASB启动初期更应关注甲烷产量的变化。UASB可有效去除热水解滤液中有有机物并转化为甲烷,具有实现污泥高效稳定化及资源化的潜力。

② 高含固污泥热水解滤液进行UASB厌氧处理时,出水氨氮浓度及pH可分别升至(2 532.37±129.93) mg/L、8.02±0.28,具有良好的缓冲能力。因此,在UASB处理热水解滤液时,相比于有机负荷提升引起的酸积累,应更注重氨抑制的风险。

③ UASB启动初期,由于沼气产量及进水量较低,导致UASB中气体及液体的上升流速较低,进而引起处理效率下降及气泡产生的问题,可采用间歇进水运行并增设内回流的方式,增加UASB内的上升流速。待有机负荷进一步提升及产气量增加后,可采用连续运行的方式。

参考文献:

- [1] 李金河,张波涛,刘宝玉,等. 污泥中温厌氧消化最佳温度及改善机理分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(3): 9-15.
LI Jinhe, ZHANG Botao, LIU Baoyu, *et al.* Optimal reaction temperature in mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge and its promotion mechanism[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(3): 9-15 (in Chinese).
- [2] 蔡辰,杨婉,杨东海,等. 水热处理高含固污泥的无害化效能和资源属性影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3719-3725.
CAI Chen, YANG Wan, YANG Donghai, *et al.* Hydrothermal treatment of high solid sludge: harmless performance and bioresource properties [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10): 3719-3725 (in Chinese).
- [3] 宋晓雅. 小红门污泥热水解厌氧消化项目运行两周年之回顾[J]. 中国给水排水, 2018, 34(22): 116-122.
SONG Xiaoya. Review of biennial operation of Xiaohongmen thermal hydrolysis anaerobic digestion system[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(22): 116-122(in Chinese).
- [4] BARBER W P F. Thermal hydrolysis for sewage treatment: a critical review [J]. Water Research, 2016, 104: 53-71.
- [5] 杜朝丹,陈美香,林志龙,等. 热水解+厌氧消化处理市政污泥示范工程[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 97-99,104.
DU Chaodan, CHEN Meixiang, LIN Zhilong, *et al.* Demonstration project of municipal sludge treatment by thermal hydrolysis and anaerobic digestion process [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10): 97-99,104 (in Chinese).
- [6] 杜强强,戴明华,张晏,等. 热水解厌氧消化工艺用于污水厂泥区升级改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(2): 46-50.
DU Qiangqiang, DAI Minghua, ZHANG Yan, *et al.* Application of thermal hydrolysis/anaerobic digestion process to upgrading of sludge treatment zone [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 46-50 (in Chinese).
- [7] ZHEN G Y, LU X Q, KATO H, *et al.* Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: current advances, full-scale application and future perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 559-577.
- [8] 廖勇,盛维杰,段励强. 不同有机质污泥热水解直接脱水及厌氧消化潜力中试研究[J]. 广东化工, 2021, 48(4): 73-75,99.
LIAO Yong, SHENG Weijie, DUAN Liqiang. Pilot-scale study on the potential of thermal hydrolysis, direct dehydration and anaerobic digestion of different organic sludge [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(4): 73-75,99(in Chinese).
- [9] 韩芸,代璐,卓杨,等. 热水解高含固污泥的有机物分布及厌氧消化特性[J]. 环境化学, 2016, 35(5): 964-971.
HAN Yun, DAI Lu, ZHUO Yang, *et al.* Organic matter distribution and anaerobic digestion of thermal hydrolysis pretreated high-solid sludge [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(5): 964-971 (in Chinese).
- [10] HAN Y, ZHUO Y, PENG D C, *et al.* Influence of thermal hydrolysis pretreatment on organic transformation characteristics of high solid anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2017, 244: 836-843.
- [11] 李俊生,谭冲,夏至,等. UASB反应器处理PTA废水的启动及污泥特性分析[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 2512-2520.
LI Junsheng, TAN Chong, XIA Zhi, *et al.* Analysis on sludge characteristics and start-up of UASB treating PTA wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(9): 2512-2520 (in Chinese).
- [12] QIAO W, YIN Z B, WANG W, *et al.* Pilot-scale experiment on thermally hydrolyzed sludge liquor anaerobic digestion using a mesophilic expanded granular sludge bed reactor [J]. Water Science and Technology, 2013, 68(4): 948-955.
- [13] 郑俊,张德伟,冯晓明,等. 餐厨废水强化EGSB反应器处理焦化废水的启动[J]. 中国给水排水, 2016, 32

- (19): 84-88.
- ZHENG Jun, ZHANG Dewei, FENG Xiaoming, *et al.* Start-up of EGSB reactor with addition of kitchen wastewater for treatment of coking wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32 (19): 84-88 (in Chinese).
- [14] 梅冰, 彭绪亚, 王璐, 等. CSTR反应器厌氧消化餐厨垃圾启动过程的监控[J]. *中国给水排水*, 2013, 29 (11): 18-21.
- MEI Bing, PENG Xuya, WANG Lu, *et al.* Start-up monitoring of CSTR for anaerobic digestion of food waste [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(11): 18-21 (in Chinese).
- [15] TAKASHIMA M, YAGUCHI J. High-solids thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge: effect of ammonia concentration[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2021, 23: 205-213.
- [16] DAI X H, HU C L, ZHANG D, *et al.* Impact of a high ammonia-ammonium-pH system on methane-producing archaea and sulfate-reducing bacteria in mesophilic anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 598-605.
- [17] DUAN N N, DONG B, WU B, *et al.* High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: feasibility study [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 104: 150-156.
- [18] CHEN S S, LI N, DONG B, *et al.* New insights into the enhanced performance of high solid anaerobic digestion with dewatered sludge by thermal hydrolysis: organic matter degradation and methanogenic pathways [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 342: 1-9.
- [19] WANG L P, CHANG Y Z, LI A M. Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: a review [J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2019, 108: 423-440.
- [20] 李彬彬, 余静, 何成达, 等. OSA工艺活性污泥的吸附性能研究[J]. *环境工程*, 2016, 34 (S1): 272-277, 311.
- LI Binbin, YU Jing, HE Chengda, *et al.* Study on adsorption properties of activated sludge in the OSA process [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34 (S1): 272-277, 311(in Chinese).
- [21] 罗光俊, 康媏. UASB处理反渗透膜生产废水的启动研究[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(13): 77-80.
- LUO Guangjun, KANG Ti. Start-up of UASB reactor for treatment of wastewater from RO membrane manufacturers [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(13): 77-80 (in Chinese).
- [22] 刘阳春, 袁林江. 外循环UASB反应器处理黑水试验研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(21): 97-99, 104.
- LIU Yangchun, YUAN Linjiang. Research on blackwater treatment in external circulation UASB reactor[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(21): 97-99, 104(in Chinese).
- [23] 余亚琴, 吕锡武, 吴义锋. 外循环UASB处理太湖富藻水运行特性研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(1): 87-92.
- YU Yaqin, LÜ Xiwu, WU Yifeng. Study on performance of external circulation UASB reactor treating algae-laden water from Taihu Lake [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(1): 87-92 (in Chinese).
- [24] 刘华, 李静, 孙丽娜, 等. 蒸氨/氨吹脱两级工艺处理高浓度氨氮废水[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(20): 96-99.
- LIU Hua, LI Jing, SUN Lina, *et al.* Treatment of high concentration ammonia nitrogen wastewater by distillation and stripping [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(20): 96-99(in Chinese).
- [25] 沈明玉, 吴莉娜, 李志, 等. 厌氧氨氧化在废水处理中的研究及应用进展[J]. *中国给水排水*, 2019, 35 (6): 16-21.
- SHEN Mingyu, WU Lina, LI Zhi, *et al.* Research and application progress of anaerobic ammonium oxidation in wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(6): 16-21 (in Chinese).
- [26] 雷颀, 方红莲, 郭勤, 等. MAP-铁碳芬顿-A²/O组合工艺处理高氨氮制药废水[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 88-93.
- LEI Jie, FANG Honglian, GUO Qin, *et al.* Application of MAP-Fe/C-Fenton-A²/O process to treat pharmaceutical wastewater containing high concentration of ammonia nitrogen [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(18): 88-93(in Chinese).

作者简介: 连洁(1994-), 女, 陕西澄城人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为污泥处理与处置。

E-mail: 1666731651@qq.com

收稿日期: 2021-06-13

修回日期: 2021-09-15

(编辑: 任莹莹)