

微氧颗粒污泥强化剩余污泥与餐厨垃圾协同消化

董春娟¹, 潘青业², 葛启隆¹, 闫泽飞¹, 于伟光¹

(1. 太原学院 环境科学与工程系, 山西 太原 030009; 2. 太原理工大成工程有限公司, 山西 太原 030024)

摘要: 为确定剩余污泥高效消化的有效方式, 采用不接种颗粒污泥(NOGS)和接种颗粒污泥(GS)的EGSB反应器处理含固率为10%的剩余污泥。在27~33℃的中温条件下, 当回流量为10 L/h、液体上升流速为1.5 m/h、消化时间为21 d时, 对比NOGS-EGSB厌氧消化剩余污泥、GS-EGSB厌氧消化剩余污泥、GS-EGSB厌氧消化热水解(90℃、45 min)的剩余污泥(+后期微氧)和GS-EGSB微氧消化剩余污泥(+后期餐厨垃圾协同消化)的运行效果。结果表明, EGSB反应器中回流形成的适度搅拌能强化对剩余污泥的处理。高活性颗粒污泥内丰富的微生物菌群的集群协同作用保证了对剩余污泥的高效处理效果。热水解能够强化剩余污泥中微生物的溶胞效果, 提高微生物细胞中有机物的溶出率, 但微氧曝气对溶出后有机物的降解更有效。微氧EGSB反应器能够高效处理剩余污泥, 少量餐厨垃圾的加入能够促进剩余污泥的消化。高活性颗粒污泥、微氧曝气、餐厨垃圾协同消化是EGSB反应器高效处理剩余污泥的关键因子。

关键词: 剩余污泥; 餐厨垃圾; 协同消化; 微氧颗粒污泥; EGSB

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0118-07

Synergistic Digestion Characteristic of Excess Sludge and Food Waste Enhanced by Micro-aerobic Granular Sludge

DONG Chun-juan¹, PAN Qing-ye², GE Qi-long¹, YAN Ze-fei¹,
YU Wei-guang¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030009, China;
2. Dacheng Engineering Co. Ltd. of Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to determine effective methods for efficient digestion of excess sludge, excess sludge with 10% solid content was treated by EGSB with or without inoculated granular sludge (GS and NOGS) respectively. Under the condition of flow rate of 10 L/h, liquid rising velocity of 1.5 m/h, digestion for 21 days at 27–33℃, the effects of four operational strategies were compared: anaerobic digestion of excess sludge by NOGS-EGSB, anaerobic digestion of excess sludge by GS-EGSB, anaerobic digestion of excess sludge thermal hydrolyzed at 90℃ for 45 min (+ micro-aeration at the later stage), and micro-aerobic digestion of excess sludge by GS-EGSB (+ synergistic digestion with food waste at the later stage). The results showed that the digestion of excess sludge could be enhanced by the appropriate agitation formed by the effluent recycle of the EGSB. The efficient treatment of excess sludge was achieved by the synergistic effect of abundant microbial community inhabited in the high activity granular

sludge. Thermal hydrolysis could enhance the cell wall breaking of microorganisms in excess sludge and furthermore improve the dissolution rate of organic matter in microbial cells. However, the micro-aeration was a more effective degradation way for the dissolved organic compounds. Excess sludge could be efficiently treated by the micro-aerobic EGSB, and the addition of food waste could promote the digestion of excess sludge. High activity granular sludge, micro-aerobic aeration and synergistic digestion of food waste were the key factors for efficient treatment of excess sludge in EGSB.

Key words: excess sludge; food waste; synergistic digestion; micro-aerobic granular sludge; EGSB

近年来,随着我国污水处理能力的快速提高,污泥量也同步大幅增加。目前,比较认可的污泥可持续处理技术路线为:消化(回收生物质能)—焚烧—灰分利用^[1]。但污泥中的有机物大部分是微生物细胞物质,其被细胞壁包裹不利于生物降解,导致剩余污泥厌氧消化存在污泥停留时间长(SRT为20~30 d)和反应器体积大等缺点^[2-3]。因此,提高剩余污泥厌氧消化效率至关重要。

热处理由于可破坏污泥絮体结构,使胞内水分从细胞中释放出来,常被用于改善污泥的脱水性能,同时该过程还可以促进胞内碳水化合物、蛋白质等物质的释放,给后续厌氧消化提供充足的物质^[4-5]。而剩余污泥厌氧消化的效率在很大程度上取决于厌氧微生物种群多样性及优势种群的活性,颗粒污泥是一种特殊的不同代谢种群的群聚体,能够保证微生物菌群的高活性,进而保证了颗粒污泥对各种污染物质的高效处理,尤其是对一些高浓度、难降解污染物质的高效去除^[6-7]。

EGSB反应器不仅具有颗粒污泥这种特殊的微生物群聚体的优势,更具有颗粒污泥和被代谢物质之间高效传质的优势。同时,依托微氧EGSB反应器概念的引入,形成了厌氧-好氧共存的微环境,这为EGSB反应器高效处理含难降解、毒性污染物质废水提供了保证,同时也为高效处理剩余污泥提供了可能^[8]。目前,剩余污泥厌氧消化的TS和VS去除率始终维持在较低水平,可能是由于剩余污泥中所含易降解有机物的水平过低。而餐厨垃圾中易降解有机物含量偏高,单纯厌氧消化易出现pH值偏低,进而抑制厌氧消化过程的问题。有研究者提出,可以通过添加少量餐厨垃圾来保证剩余污泥的高效消化^[9-10]。

笔者对是否接种颗粒污泥、剩余污泥是否热水解预处理、是否微氧曝气、是否添加餐厨垃圾协同消

化等情况下EGSB反应器内剩余污泥的消化效果进行对比分析,确定微氧颗粒污泥强化剩余污泥与餐厨垃圾协同消化的效果,以寻找剩余污泥高效消化的有效方式。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用EGSB反应器高为2.3 m,有效容积为18 L。其中,反应区高为1.8 m,内径为10 cm,有效容积为12 L,工艺流程如图1所示。待处理剩余污泥可以一次性或连续加入反应器内。在反应区和沉淀区分别设置循环,一方面能保证反应区内污泥的充分搅拌,另一方面也可保证反应初期沉淀区大量的浮泥回到反应区。通过在反应器适当位置曝气来保证反应器内的微氧环境。

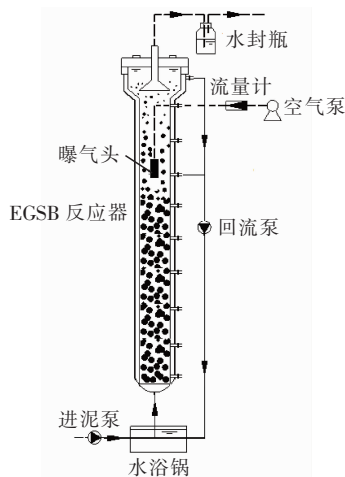


图1 EGSB反应器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of EGSB reactor

EGSB反应器内接种的颗粒污泥取自某稳定运行的EGSB反应器,其TS为63 g/L、VS为37 g/L、VS/TS值为0.59。

取太原杨家堡污水处理厂剩余污泥,其含固率为16%、TS为176.26 g/L、VS为122.8 g/L、VS/TS

值为0.69,试验中以此泥为基础配制含固率为10%的试验用泥。

1.2 试验方法

平行运行两个EGSB反应器,一个用于培养颗粒污泥(高效稳定运行半年以上,定期从中取一定量的颗粒污泥接种到处理剩余污泥的EGSB反应器中),一个用于处理剩余污泥。其中,没有接种颗粒污泥的EGSB反应器用NOGS-EGSB表示,接种颗粒污泥的EGSB反应器用GS-EGSB表示。EGSB处理剩余污泥时采用间歇方式运行,将需要处理的含固率为10%的剩余污泥一次性放入反应器中,通过回流保持反应器内一定的上升流速(1.5 m/h),以搅拌污泥,稳定运行21 d,期间监测反应器内TS和VS的变化。

NOGS-EGSB 厌氧消化剩余污泥:主要考察EGSB反应器回流搅拌污泥的厌氧消化效果。向反应器内一次性加入7.2 L剩余污泥(含固率为10%),回流量为10 L/h,以保证1.5 m/h的上升流速,充分搅拌污泥。

GS-EGSB 厌氧消化剩余污泥:主要考察颗粒污泥厌氧消化剩余污泥的效果。反应器颗粒污泥与剩余污泥的加入比例为1:2,其中颗粒污泥为2.4 L,剩余污泥(含固率为10%)为4.8 L。回流量为10 L/h,污泥上升流速为1.5 m/h,充分搅拌污泥。

GS-EGSB 厌氧消化热水解剩余污泥(+后期微氧曝气):主要考察颗粒污泥厌氧消化热水解剩余污泥的效果。接种2.4 L颗粒污泥,加入4.8 L经90℃、45 min热处理的剩余污泥(含固率为10%)。污泥回流量为10 L/h,上升流速为1.5 m/h,充分搅拌污泥。装置运行第11天时采用微氧曝气,曝气量为2 000 mL/min。

GS-EGSB 微氧消化剩余污泥(+后期餐厨垃圾协同消化):主要考察颗粒污泥微氧消化剩余污泥的效果。颗粒污泥量为2.4 L,剩余污泥(含固率为10%)量为4.8 L,微氧曝气,曝气量为2 000 mL/min。运行第15天时添加120 mL餐厨垃圾协同消化(餐厨垃圾相关性能参数:TS为188 g/L,VS为180 g/L,VS/TS值为0.96,TCOD为267.47 g/L,SCOD为61.99 g/L)。

按照《水和废水监测分析方法》(第4版)中的相关方法测定TS、VS、TCOD、SCOD、VFA和碱度,pH值采用雷磁PHS-3C酸度计测定。

2 结果与讨论

2.1 NOGS-EGSB 厌氧消化剩余污泥的运行效果

NOGS-EGSB反应器厌氧消化剩余污泥过程中,TS、VS、VFA、碱度、VFA/碱度值和pH值的变化如图2所示。从图2(a)可以看出,随着剩余污泥消化时间的延长,NOGS-EGSB反应器内TS和VS的浓度逐渐下降。21 d消化结束后,TS和VS分别从最初的21.40 g/L和14.62 g/L降低至14.63 g/L和8.99 g/L,相应去除率分别为31.64%和38.51%,且TS和VS去除率在前期增加较快,后期缓慢。从图2(b)可以看出,NOGS-EGSB反应器刚开始厌氧消化剩余污泥时,VFA浓度高达14.65 mmol/L,碱度只有9.21 mmol/L,VFA/碱度值为1.59,pH值为6.86。21 d消化结束时,VFA浓度下降至3.00 mmol/L,碱度为13.47 mmol/L,VFA/碱度值降低至0.22,pH值增加至8.39。污泥厌氧消化前期,虽然TS和VS降解迅速,但VFA并未累积,且VFA可同步快速降低,碱度也能快速提高。厌氧消化后期,VFA始终能够维持在2.8~3.53 mmol/L的低水平,VFA/碱度值在0.17~0.27范围内波动,pH值为8.23~8.39。

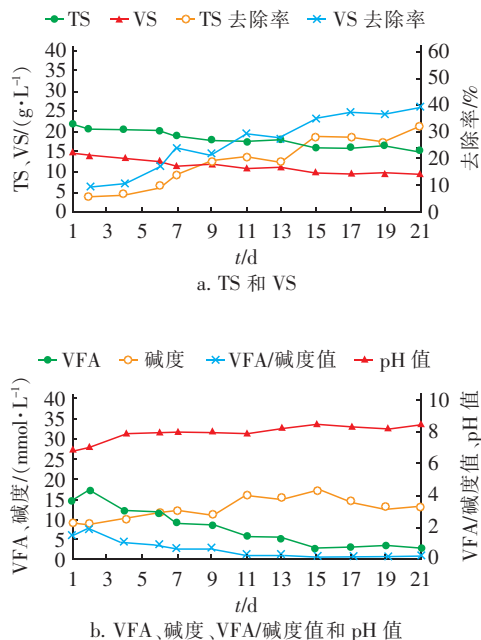


图2 NOGS-EGSB反应器中TS、VS、VFA、碱度、VFA/碱度值和pH值的变化

Fig. 2 Change of TS, VS, VFA, alkalinity, VFA/alkalinity and pH in NOGS-EGSB reactor

由此可见,剩余污泥自身含有较丰富的微生物

菌群,且活性较高,当EGSB反应器回流产生的高上升流速对剩余污泥形成适度搅拌时,剩余污泥中的TS和VS能够快速被降解,而且反应器内VFA能够保持在较低水平,pH值能够维持在8.0以上。厌氧消化持续了21 d,但TS和VS去除率并没有达到40%以上。而且,在此过程中,剩余污泥的VS/TS值由0.66下降到了0.59,说明剩余污泥中更多的易降解物质被去除或降解。

2.2 GS-EGSB 厌氧消化剩余污泥的运行效果

接种高活性颗粒污泥的EGSB反应器厌氧消化剩余污泥的运行效果如图3所示。

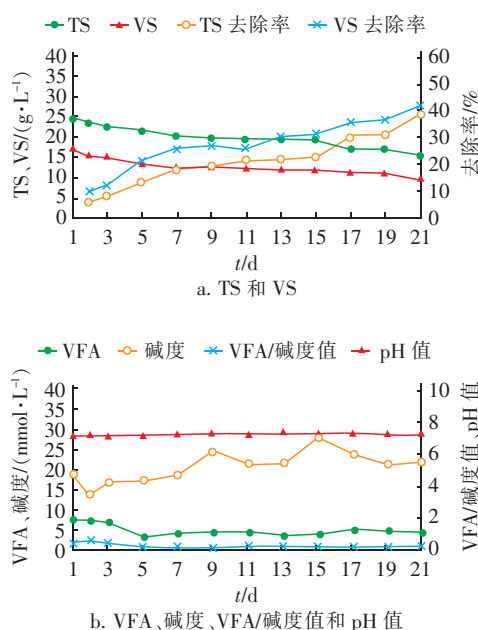


图3 GS-EGSB反应器中TS、VS、VFA、碱度、VFA/碱度值和pH值的变化

Fig. 3 Change of TS, VS, VFA, alkalinity, VFA/alkalinity and pH in GS-EGSB reactor

从图3(a)可以看出,接种高活性颗粒污泥后,EGSB反应器对TS和VS的去除率分别为38.32%和42.38%。经过21 d的厌氧消化,没有接种颗粒污泥时,VS/TS值从0.66下降到0.59;而接种颗粒污泥后,VS/TS值从0.65下降到了0.64,说明颗粒污泥能够降解剩余污泥中的某些难降解物质。从图3(b)可以看出,接种颗粒污泥后,VFA在厌氧消化期均能维持很低的水平,第1天为7.77 mmol/L,第5天下降至3.46 mmol/L,随后一直稳定在3.46~4.75 mmol/L的低水平,而碱度始终维持在13.55~27.68 mmol/L的高水平。由此可见,高活性的颗粒污泥能够高效处理剩余污泥,并且可快速降解反应

过程中产生的SCOD(没有出现VFA积累),试验期间消化液中的SCOD始终维持在311~644 mg/L的低水平。

2.3 GS-EGSB 厌氧消化热水解污泥的运行效果

接种颗粒污泥后,EGSB反应器厌氧消化剩余污泥的TS去除率仍然没有超过40%,可能是由于剩余污泥中的有机物主要存在于微生物细胞内部,有机物释放困难是影响厌氧消化效果的主要原因之一。传统热水解温度往往高达150~200℃,运行中能耗较高,本试验采用90℃、45 min的低温热水解条件对剩余污泥进行预处理,然后在GS-EGSB反应器内进行厌氧消化,后期进行微氧曝气,图4为TS和VS的变化。可以看出,热水解后的剩余污泥能够被快速降解。第2天时,系统对TS和VS的去除率高达14.19%和17.42%,说明热水解能够加速剩余污泥微生物细胞中有机物的有效溶出(剩余污泥中SCOD从4398 mg/L提高到14887 mg/L)。但随后TS和VS的降解速率增幅逐渐变缓,第11天对TS和VS的去除率仅仅只达到29.09%和34.24%。可见,通过热水解处理(90℃、45 min)后,剩余污泥的溶胞效果对TS和VS的强化去除效果有限。

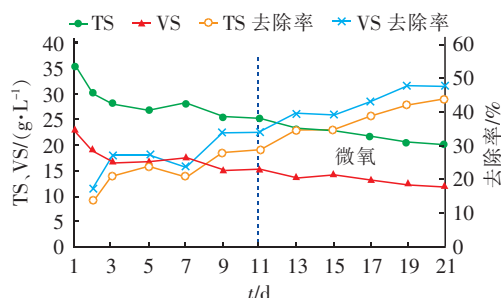


图4 TS和VS的变化

Fig. 4 Change of TS and VS

综上所述,可以考虑通过提高热水解温度或延长热水解时间来提高污泥破解率,但高温热处理能耗较高,对设备的要求也更加严格,限制了其工程应用。本研究同步进行血清瓶试验,在低温(90℃)、不同热水解时间(0、30、45、60、90 min)条件下,分析颗粒污泥厌氧消化剩余污泥的处理效果。试验结果表明,在90℃、45 min条件下甲烷产率最高,达到48.2 mL/d(未热水解时仅为24.2 mL/d)。进一步延长至60和90 min时,甲烷产率反而下降至43.2 mL/d和46.8 mL/d。由此可见,延长热水解时间并

不能强化剩余污泥的厌氧消化效果。

有研究表明^[6],微氧条件同样具有降解大分子难降解物质的作用。本试验通过微氧条件强化破坏剩余污泥中微生物的细胞壁结构,促进细胞溶解,强化颗粒态的大分子难降解有机物转化为小分子易降解有机物,进而也强化了剩余污泥的消化过程。EGSB 反应器运行到第 11 天时开始微氧曝气,第 13 天时系统对 TS 和 VS 的去除率分别达到了 34.87% 和 39.59%,第 17 天时为 38.85% 和 43.21%,第 19 天时为 42.02% 和 47.48%,第 21 天时 TS 和 VS 的去除率增加放缓,分别为 43.87% 和 47.74%。微氧曝气仅仅 1 周左右,系统对 TS 和 VS 的去除率均达到 40% 以上。由此可见,虽然热水解能够强化剩余污泥中微生物细胞的破壁作用,但对破壁后某些大分子难降解物质的去除作用有限。在微氧条件下,尤其是微氧与颗粒污泥的双重作用下,能够强化大分子难降解物质转化为小分子易降解物质。

GS-EGSB 反应器对 90 ℃、45 min 热水解后的剩余污泥进行厌氧和微氧消化过程中,VFA、碱度、VFA/碱度值和 pH 值的变化如图 5 所示。可以看出,GS-EGSB 反应器厌氧消化热水解后的剩余污泥,其 VFA 一直保持在较高水平,且高水平的碱度保证了反应器内 pH 值在 7.5 左右,说明此阶段剩余污泥厌氧消化过程进展并不顺利,后续产甲烷阶段受到了抑制。这可能是由于热水解剩余污泥产生了某些特殊的难降解物质,对甲烷菌产生了一定的抑制作用。微氧曝气后,VFA 持续降低,虽然此阶段碱度已经低至 6.36 ~ 24.64 mmol/L,但 pH 值能保持在 8.5 以上。可见,微氧曝气能够强化系统对剩余污泥中某些难降解物质的去除,提高污泥的产甲烷活性,以保证消化过程的顺利进行。

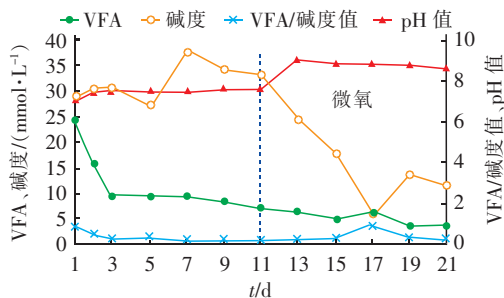


图5 VFA、碱度、VFA/碱度值和 pH 值的变化情况

Fig. 5 Change of VFA, alkalinity, VFA/alkalinity and pH

由此可见,热水解作为一种污泥预处理手段,能够强化剩余污泥中微生物的溶胞效果,提高微生物

细胞中有机物的溶出率,而微氧对溶出后有机物的降解更有效。

2.4 GS-EGSB 微氧消化剩余污泥的运行效果

GS-EGSB 反应器微氧消化剩余污泥的运行效果如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,微氧曝气能够强化剩余污泥中系统对 TS 和 VS 的去除。第 11 天时,系统对 TS 和 VS 的去除率分别为 29.25% 和 33.46%,与同一时间下热水解剩余污泥厌氧消化的 TS 和 VS 去除率基本相当。随后微氧消化的 TS 和 VS 去除率快速升高,至第 15 天时达到了 41.38% 和 47.02%。值得注意的是,前期厌氧消化热水解剩余污泥的试验从第 11 天开始也进行微氧曝气,但到第 15 天时系统对 TS 和 VS 的去除率仅能达到 35.01% 和 38.98%。由此可见,通过单纯的微氧曝气,GS-EGSB 反应器消化剩余污泥就能获得很高的 TS 和 VS 去除率。

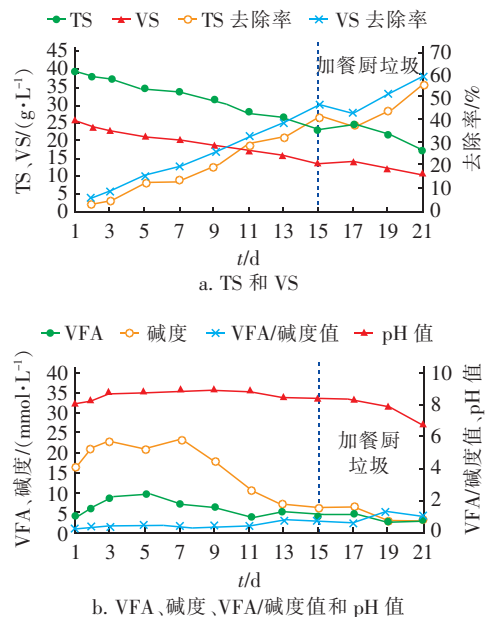


图6 微氧条件下 GS-EGSB 中 TS、VS、VFA、碱度、VFA/碱度值和 pH 值的变化

Fig. 6 Change of TS, VS, VFA, alkalinity, VFA/alkalinity and pH in GS-EGSB reactor with micro-aeration

共基质代谢是目前降解难降解物质的有效手段,本试验中通过添加少量餐厨垃圾与剩余污泥形成协同消化。GS-EGSB 反应器微氧消化剩余污泥运行到第 15 天时,向反应器内投加搅碎的餐厨垃圾(SCOD_{剩余污泥}: SCOD_{餐厨垃圾} = 5 : 1),第 17 天时系统对 TS 和 VS 的去除率稍有下降,可能是由于加入餐厨垃圾后对消化菌群有一定的冲击,餐厨垃圾也在

一定程度上提高了反应器中 TS 和 VS 的浓度。但至第 19 天时,系统对 TS 和 VS 的去除率快速升高至 44.83% 和 51.32%,至第 21 天时对 TS 和 VS 的去除率达到 55.65% 和 59.08%。由此可见,少量餐厨垃圾的加入能够促进剩余污泥的消化。

从图 6(b)可以看出,微氧曝气时反应器内始终能够保持较高的 pH 值,添加餐厨垃圾后,虽然微氧也保证了反应器内较低的 VFA 浓度,但由于系统产生的碳酸氢盐碱度不足,导致反应器内 pH 值持续下降,然而 pH 值并没有低至 6.5 以下。添加餐厨垃圾后,VFA 基本保持在 3.5 mmol/L 以下,当碱度降至最低水平(2.58 mmol/L)时,反应器内 pH 值为 7.85。随后碱度回升至 3.15 mmol/L,则 pH 值达到最低值,为 6.74,即相对于碱度,pH 值具有滞后性。高活性颗粒污泥内丰富的微生物菌群的集群协同作用不仅能保证处理剩余污泥时的高 TS 和 VS 去除率,也能够保证剩余污泥代谢产生足够的碱度,以保持 pH 值在中性以上。

3 结论

① EGSB 反应器中回流形成的适度搅拌能强化对剩余污泥的处理效果。不接种颗粒污泥时,在回流量为 10 L/h 条件下,保证了污泥 1.5 m/h 的上升流速,厌氧消化 21 d 后,系统对 TS 和 VS 的去除率分别达到 31.64% 和 38.51%,VS/TS 值由 0.66 下降到 0.59,剩余污泥中易降解物质被去除。

② 高活性颗粒污泥内丰富的微生物菌群的集群协同作用保证了系统对剩余污泥的高效处理。EGSB 反应器接种颗粒污泥后,对 TS 和 VS 的去除率分别提高至 38.32% 和 42.38%,VS/TS 值从 0.65 下降至 0.64,说明颗粒污泥能够有效降解剩余污泥中某些难降解物质。

③ 热水解能够强化剩余污泥中微生物的溶胞效果,提高微生物细胞中有机物的溶出率,但微氧对溶出后有机物的降解更有效。EGSB 反应器处理 90℃、45 min 热水解后的剩余污泥,对 TS 和 VS 的去除率短期(11 d)内分别达到了 29.09% 和 34.24%。微氧曝气量为 2 000 mL/min 时,21 d 后系统对 TS 和 VS 的去除率分别提高至 43.87% 和 47.74%,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中对好氧消化的规定。

④ 微氧 EGSB 反应器能够高效处理剩余污泥,少量餐厨垃圾的加入能够促进剩余污泥的消化。

采用 EGSB 微氧(2 000 mL/min 的曝气量)消化处理剩余污泥过程中,对 TS 和 VS 的去除率在第 15 天时分别为 41.38% 和 47.02%,按照 SCOD_{剩余污泥}:SCOD_{餐厨垃圾}=5:1 的比例添加 120 mL 的餐厨垃圾协同消化,第 21 天时,系统对 TS 和 VS 的去除率分别高达 55.65% 和 59.08%。

综上所述,高活性颗粒污泥、微氧曝气、餐厨垃圾协同消化是 EGSB 反应器高效处理剩余污泥的关键因子。

参考文献:

- [1] 郝晓地,张璐平,兰荔. 剩余污泥处理/处置方法的全球概览[J]. 中国给水排水,2007,23(20):1-5.
Hao Xiaodi, Zhang Luping, Lan Li. Global overview of excess sludge treatment and disposal methods[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(20): 1-5 (in Chinese).
- [2] Wilson C A, Novak J T. Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment [J]. Water Res, 2009, 43(18): 4489-4498.
- [3] Donoso-Bravo A, Pérez-Elvira S, Aymerich E, et al. Assessment of the influence of thermal pre-treatment time on the macromolecular composition and anaerobic biodegradability of sewage sludge [J]. Bioresour Technol, 2011, 102(2): 660-666.
- [4] Syed-Hassan S S A, Wang Y, Hu S, et al. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 888-913.
- [5] 彭永臻,郭思宇,李夕耀,等. 低温热处理对剩余污泥有机物溶出及脱水性能改变的影响[J]. 北京工业大学学报,2017,43(3):473-480.
Peng Yongzhen, Guo Siyu, Li Xiyao, et al. Effect of low temperature thermal treatment on organic matter solubilization and dewaterability change of waste activated sludge [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(3): 473-480 (in Chinese).
- [6] 董春娟,李宏伟,孙亚全,等. 交叉回流两级微氧 EGSB 反应器处理焦化废水运行效能[J]. 中国给水排水,2017,33(7):134-138.
Dong Chunjuan, Li Hongwei, Sun Yaqian, et al. Operation characteristic of cross-recirculation two-stage anaerobic EGSB reactor for treating coking wastewater

- [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(7): 134 - 138 (in Chinese).
- [7] 董春娟, 潘青业, 孙亚全, 等. 无机碳强化处理焦化废水 EGSB 反应器运行效能[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3518 - 3524.
- Dong Chunjuan, Pan Qingye, Sun Yaquan, *et al.* Operational characteristic of EGSB reactor treating coking wastewater after adding inorganic carbon [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(6): 3518 - 3524 (in Chinese).
- [8] Dong C J, Lu Y H, Sun Y Q. Acclimation of granules when treating actual coking wastewater: continuous versus intermittent oxygenation [J]. Adv Mater Res, 2013, 777: 182 - 186.
- [9] 王永会, 赵明星, 阮文权, 等. 餐厨垃圾与剩余污泥混合消化产沼气协同效应[J]. 环境工程学报, 2014, 8(6): 2536 - 2542.
- Wang Yonghui, Zhao Mingxing, Ruan Wenquan, *et al.* Synergistic effect of anaerobic co-digestion of food waste and excess sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(6): 2536 - 2542 (in Chinese).
- [10] Xin X D, He J G, Feng J H, *et al.* Solubilization augmentation and bacterial community responses triggered by co-digestion of a hydrolytic enzymes blend for facilitating waste activated sludge hydrolysis process [J]. Chem Eng J, 2016, 284: 979 - 988.



作者简介: 董春娟 (1970 -), 女, 山西临汾人, 博士, 教授, 研究方向为水污染控制和污泥资源化。

E-mail: chunjuand@126.com

收稿日期: 2018 - 10 - 23

(上接第 117 页)

- Liu Yong, Guo Huaicheng, Zhou Feng, *et al.* Watershed approach as a framework for lake-watershed pollution control [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(2): 337 - 344 (in Chinese).
- [3] 郭怀成, 刘永, 贺彬. 流域环境规划典型案例[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- Guo Huaicheng, Liu Yong, He Bin. Typical Case of Watershed Environmental Planning [M]. Beijing: Peking University Press, 2007 (in Chinese).
- [4] 邹秀萍, 詹卫华, 黄利群, 等. 制度创新是水生态文明建设的关键[J]. 水利经济, 2015, 33(2): 43 - 47.
- Zou Xiuping, Zhan Weihua, Huang Liqun, *et al.* Institutional innovation is the key to the construction of aquatic ecological civilization [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015, 33(2): 43 - 47 (in Chinese).
- [5] 马建华. 稳步推进长江流域综合管理的思考[J]. 中国水利, 2014(6): 34 - 37.
- Ma Jianhua. Implementation of integrated management in Yangtze River basin [J]. China Water Resources, 2014(6): 34 - 37 (in Chinese).



作者简介: 万鹏 (1986 -), 男, 江西南昌人, 硕士, 工程师, 主要从事市政给水排水和环境工程设计与研究工作。

E-mail: 434423065@qq.com

收稿日期: 2018 - 11 - 23