

水热预处理对不同污泥性质及厌氧消化性能的影响

李伟¹ 李让玲² 李博文² 王佳伟¹ 郭建斌² 董仁杰²

(1. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京 100022; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 以不同来源污水处理过程产生的污泥为研究对象, 考察了水热预处理对污泥粘度、氨氮质量浓度、pH 值、TS (总固体) 组分含量及厌氧消化性能的影响, 并评估了不同污泥的水热改性效果及其中试条件下厌氧消化增益情况。研究表明, 同等水热温度处理下, 污泥粘度、氨氮质量浓度、pH 值受污泥来源的影响较大。水热预处理对不同污泥都具有良好的改性效果, 水热温度达到 170℃ 后, 污泥性质基本不变。各种污泥挥发性固体 (VS) 产气率随有机负荷的提高无显著性变化, 但运行情况存在差异。不同污泥在水热预处理后厌氧消化产气性能均明显提升, VS 产气率增加比例差异较大, 北京、上海、山东三地污泥 VS 产气率增加 25.2% ~ 69.8%, 由于广西污泥为纯剩余污泥, 水热处理后 VS 产气率增加高达 101.6% ~ 133.8%。VS 产气率的增加量相差不大, 且随自身产气性能改变的波动较小, 增加量为 83 ~ 218 m³/t (平均 143 m³/t)。水热预处理后污泥流动性能提高, 可实现厌氧消化的高浓度、高负荷进料, 反应器减容率可达 38% ~ 71%。

关键词: 污泥; 水热预处理; 产气性能; 厌氧消化

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)03-0326-08

OSID:



Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment on Different Sludge Properties and Anaerobic Digestion Performance

LI Wei¹ LI Rangling² LI Bowen² WANG Jiawei¹ GUO Jianbin² DONG Renjie²

(1. Research and Development Center, Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100022, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Sludge was an important by-product of sewage treatment. With the continuous expansion of number and scale of sewage treatment plants, the amount of sludge generated was increased. In the process of sludge stabilization, harmless and resource treatment, hydrothermal pretreatment and anaerobic digestion technology were widely used. In order to compare and analyze the effects of hydrothermal treatment on sludge properties and anaerobic digestion performance of different sources, the viscosity, ammonia nitrogen, pH value, TS components and anaerobic digestion performance of sludge from four different sources were studied. The results showed that under the same hydrothermal temperature treatment, sludge viscosity, ammonia nitrogen concentration and pH value were greatly affected by the sludge source. Hydrothermal pretreatment had a good modification effect on different sludges. The sludge properties remained basically unchanged after the hydrothermal temperature reached 170℃. There was no significant difference in the gas production rate of sludge from different sources with the increase of OLR, but there were differences in the operation. The gas production performance of anaerobic digestion of sludge from different sources was significantly improved after hydrothermal pretreatment, but there was a significant difference in the proportion of increased gas production rate of VS. Sludge VS gas production rate in Beijing, Shanghai and Shandong was increased by 25.2% ~ 69.8%, as the sludge in Guangxi was pure excess sludge, the gas production rate of VS was increased by 101.6% ~ 133.8% after hydrothermal treatment. However, the increase in gas production per unit VS was not significantly different, and the fluctuation with the change of gas production performance was small, the increase was about 83 ~ 218 m³/t (the average was 143 m³/t). After hydrothermal pretreatment, the fluidity of the

收稿日期: 2019-07-23 修回日期: 2019-10-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD21B04)和“十三五”国家科技重大专项(2017ZX07403002-05)

作者简介: 李伟(1986—), 男, 工程师, 主要从事污泥处理与处置研究, E-mail: tianxingliwei@163.com

通信作者: 郭建斌(1982—), 男, 副教授, 主要从事生物质工程研究, E-mail: jianbinguo@cau.edu.cn

sludge became better, the high-concentration and high-load feed of anaerobic digestion could be realized, and the capacity reduction rate of the reactor could reach 38% ~ 71%. By analyzing the hydrothermal modification effect and digestion capacity gain of different sewage sources and treatment processes, it was expected to provide reference for the design of sludge hydrothermal and anaerobic digestion processes in different regions.

Key words: sludge; thermal hydrolysis pretreatment; gas production performance; anaerobic digestion

0 引言

“十三五”生态环境保护规划要求,大力推进污泥稳定化、无害化和资源化处理处置,地级及以上城市污泥无害化处理处置率达到 90%,京津冀区域达到 95%。厌氧消化技术能够通过微生物的作用有效实现有机物降解、回收沼气能源,实现污泥的稳定化和减量化^[1]。但是污泥多以菌胶团形式存在,细胞壁和胞外聚合物对水分及有机物的包裹作用影响污泥的沉降性能和脱水性能^[2-3],厌氧消化性能较差。水热预处理能够增加溶解度^[4-5],从而达到提高污泥厌氧消化效率的目的^[6-7]。

水热预处理技术在国内的工程应用越来越广泛,近年来已成为污泥处理处置领域的研究热点^[8-9],但是,由于污水来源、水热条件、厌氧消化运行条件等不统一,目前国内关于水热预处理技术的

相关报道,尤其是实验室小试规模与工程规模的研究数据难以相互参照和对比。污水的来源和污水厂的处理工艺也会导致污泥的性质差异^[10-11],给污泥水热预处理技术的推广和应用带来不确定性。本文以我国南北方 4 种不同污泥为研究对象,对不同来源与性质污泥的水热改性效果及其中试条件下的厌氧消化增益作用进行评估,以期水热预处理技术在污泥处理处置过程的推广应用提供一定的理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验以我国南北方(北京、上海、广西、山东)污水处理厂获取的污泥为研究对象,各污水来源、污水处理工艺、脱水污泥含水率等相关污泥特性如表 1 所示。污泥取回后置于 4℃ 冷藏室保存待用。

表 1 实验用污泥的相关特性

Tab.1 Information about sludge used in experiment

污泥产地	污水来源	污水处理工艺	初沉池	污泥含水率/%	挥发性固体占总固体质量分数/%
北京	100% 生活污水	A ² /O 工艺	有	86.0 ± 2.1	78.9 ± 2.5
上海	85% 生活污水 + 15% 工业污水	改良的 AO 工艺	有	87.5 ± 1.8	64.5 ± 2.0
广西	50% 生活污水 + 50% 工业污水	A ² /O 工艺	无	83.3 ± 2.2	53.1 ± 1.9
山东	25% 生活污水 + 75% 制药废水	AB + A ² /O 工艺	无	72.7 ± 1.5	41.4 ± 1.8

1.2 实验装置

实验污泥的水热预处理采用水热闪蒸预处理中试装置进行操作,整套反应装置如图 1 所示,处理规模为 3 t/d,含水率以 80% 计。

实验所用中试厌氧消化反应器为 100 L 的连续

搅拌反应器(Continuous stirred tank reactor, CSTR),如图 2 所示。反应器具水浴夹层,采用恒温循环水浴锅进行保温,反应温度为 37℃。搅拌情况为每隔 1 h 搅拌 15 min。

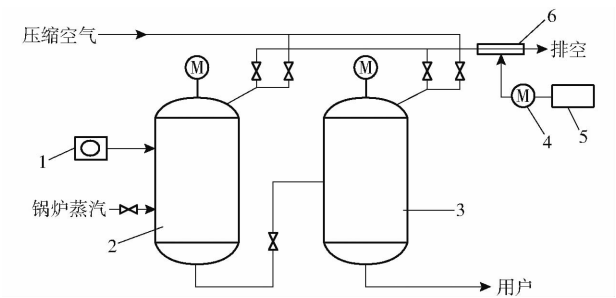


图 1 水热闪蒸预处理中试装置

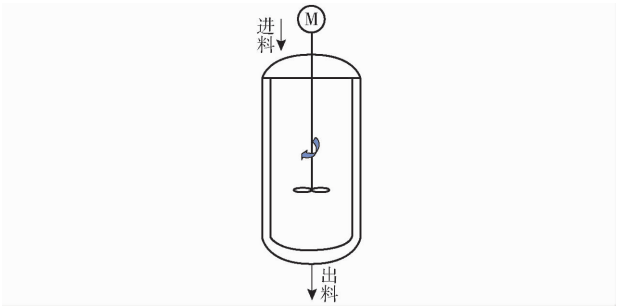


图 2 厌氧消化实验装置

Fig.2 Experimental anaerobic digestion reactor

1.3 污泥水热方法

将污泥分别通过螺杆泵输送至水热罐,利用饱

Fig.1 Pilot plant of water thermal flash pretreatment
1. 供料泵 2. 水热罐 3. 闪蒸罐 4. 循环水泵 5. 水箱 6. 换热器

和蒸汽对污泥进行加热,当污泥温度达到设定温度后,保温保压 30 min,水热完成后,通过阀体控制,使处于高温高压下的污泥冷却降压后直接从水热罐排出,水热泥分装后于 4℃ 下保存待用。

1.4 污泥水热改性特征实验

各地污泥与不同温度条件(130、150、170、180℃)处理的水热污泥在加蒸馏水统一调节总固体质量分数至 10% 后,进行不同来源污泥的水热改性特征研究,测定污泥粘度、氨氮质量浓度、pH 值、总固体组分含量。

1.5 污泥厌氧消化实验

取实验室稳定运行的中温厌氧消化污泥作为接种污泥,以 180℃ 水热处理 30 min 的预处理污泥为原料进行厌氧消化实验。根据相应水热泥的总固体质量分数配制未经水热处理的污泥,作为各对照组进料。实验过程中逐步提高厌氧反应器的有机负荷(Organic load rate, OLR),并分别从沼气产量和反应器减容效果两方面考察水热预处理对各地污泥厌氧消化性能的促进作用。

1.6 分析方法

总固体(Total solid, TS)含量、挥发性固体(Volatile solid, VS)含量分别采用 105、600℃ 恒重法检测,采用 5 000 r/min 离心和 105℃ 干燥恒重法检测悬浮固体(Suspend solid, SS)含量,挥发性悬浮固体(Volatile suspended solids, VSS)含量的检测方法为将 105℃ 质量恒定后的 SS 在 600℃ 下再次加热至质量恒定。采用 NDJ-1S 型粘度计检测粘度。采用梅特勒 FiveEasy Plus 台式 pH 计测定 pH 值。氨氮质量浓度的检测方法参照文献[12]。

各指标在不同条件之间的差异显著性通过

SPSS 21.0 软件进行双因素方差分析($P < 0.01$, 表示差异极显著; $P < 0.05$, 表示差异显著; $P > 0.05$, 则差异不显著);数据采用 Origin 8.5 软件整理制图。

2 结果与讨论

2.1 不同来源污泥的水热改性特征

2.1.1 污泥粘度

污泥粘度是污泥流动性能的评价指标,其对于后续污泥输送设计及控制具有重要意义。粘度越大,运输阻力越大,所消耗的功率越大。从图 3(图中不同字母表示差异显著,下同)可以看出,同等温度处理后,各地污泥粘度始终差异显著($P < 0.05$)。粘度从大到小依次为北京、上海、广西、山东,与表 1 中各污泥的挥发性固体含量在总固体含量中的比例相对应,可见污泥粘度随挥发性固体含量的增加而增加。文献[13]研究了 12、22、32℃ 下不同浓度污泥的粘度,发现污泥浓度基本决定了污泥的粘度,低温下污泥温度对粘度影响相对较小。本研究北京、上海、广西的原泥粘度较高,分别为 46.327、31.423、24.332 Pa·s,山东污泥的粘度(3.440 Pa·s)相对较低,可能是因其污水处理主要采用 AB 工艺,污泥中的胞外聚合物含量较少^[14]。北京、上海和广西的污水处理工艺分别为 A²/O、改良的 AO 和 A²/O,其胞外聚合物产生量相对较大。随着水热反应温度的升高,污泥粘度下降极显著($P < 0.01$)^[15-16],其对反应温度的敏感度高于对浓度的敏感度,在超过 150℃ 后各地污泥粘度降幅趋于平缓。170、180℃ 处理下污泥粘度无显著差异($P > 0.05$)。这主要是由于随着水热反应温度的逐渐升高,大颗粒物质首先发生溶解,150℃ 以下主要以糖

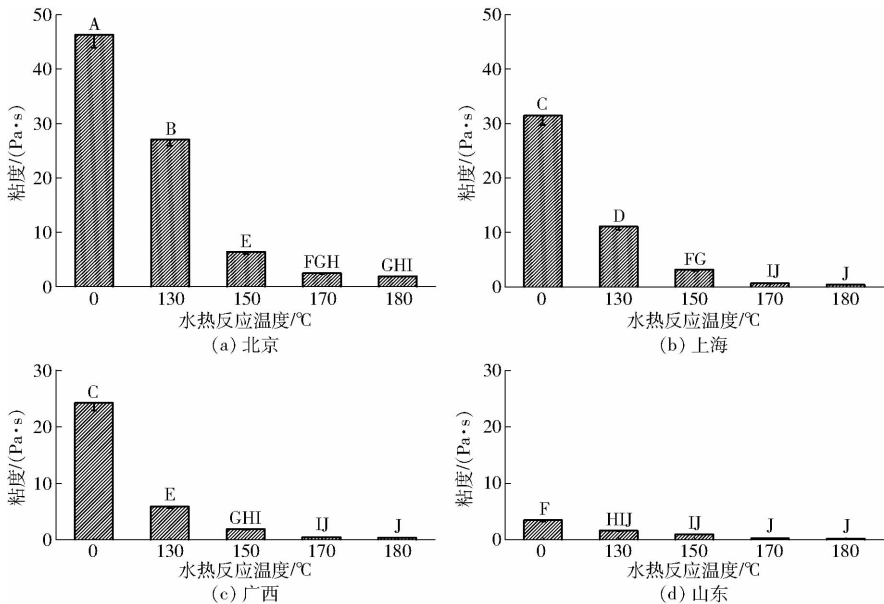


图3 不同水热反应温度下各污泥的粘度变化

Fig. 3 Viscosity changes of each sludge at different hydrothermal reaction temperatures

类溶解为主,当温度继续升高,温度超过 150℃,细胞壁开始破碎,蛋白质的溶解加快^[17-18]。温度继续上升至 170℃,污泥的水解更加彻底,整个污泥呈现出更加均匀的状态,这种情况下加大反应温度对污泥粘度几乎无影响^[19]。由此可见,污泥来源对污泥粘度影响显著,170℃ 水热处理不同来源的污泥即可达到较好的粘度效果。

2.1.2 污泥氨氮质量浓度和 pH 值

污泥中氮的主要组成为不溶态有机氮、溶解态有机氮及氨氮。不溶态有机氮主要为蛋白质,溶解态有机氮主要包括氨基酸等。水热反应过程中,部分含氮物质转化为氨氮。由图 4 可知,不同来源污泥中的氨氮质量浓度随着水热反应温度的升高都极显著增加($P < 0.01$),但不同污泥的增加规律表现出极显著差异($P < 0.01$)。北京污泥在 130℃ 和 150℃ 的水热温度下,氨氮质量浓度增加较少,温度达到 170℃ 和 180℃ 时增加明显。上海污泥和广西污泥的氨氮质量浓度增幅随着温度的增加越来越

大,山东污泥的氨氮质量浓度在 130℃ 和 150℃ 的水热温度下显著增加,但 170℃ 后增加不明显。总体上,当污泥水热反应温度达到 150℃ 后,各污泥氨氮质量浓度极显著增加($P < 0.01$),此时受污泥来源的影响很小($P > 0.05$)。而当温度达到 170℃ 时,继续增加水热反应温度,氨氮质量浓度增幅不大($P > 0.05$)。这是由于微生物细胞被破坏,释放了大量的蛋白质类物质,蛋白质的溶解和进一步水解带来氨氮质量浓度增加^[20]。在 170℃ 水热处理后,原污泥中可以转化为氨氮的蛋白质、氨基酸等含氮物质已基本完成转化^[21]。同时水热过程有机物的溶解和分解会产生大量的挥发性有机酸^[22],其表现为污泥 pH 值的下降,如图 5 所示。水热反应温度达到 150℃ 后,pH 值受温度影响很小($P > 0.05$),受来源影响极显著($P < 0.01$)。这是由于当水热温度大于 150℃ 时,污泥中的氨氮质量浓度显著升高,缓冲体系大大增强;另外,微生物细胞破坏还会释放大量的碱金属离子 K^+ 和 Na^+ 。

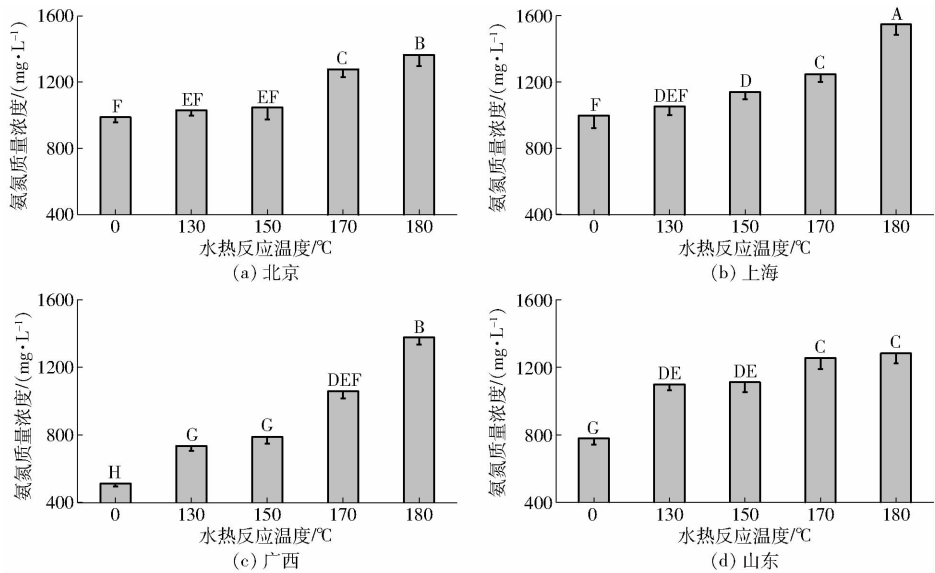


图 4 各污泥中氨氮质量浓度随水热反应温度的变化
Fig. 4 Variations of ammonia nitrogen concentration in each sludge with hydrothermal reaction temperatures

2.1.3 污泥 TS 组分

图 6 为水热处理前后不同污泥 TS 组分变化规律^[23],进一步验证了污泥粘度、氨氮质量浓度、pH 值等指标的变化。随着水热反应温度的升高,大量有机物由固相转移到液相,各地污泥中的 SS 质量分数逐渐下降,其中 VSS 溶解比例明显大于不易挥发的悬浮固体(Fixed suspended solid, FSS),可见悬浮固体中有机物比无机物溶解程度高。山东污泥受自身 TS 组分的影响,热水解后其变化程度不及北京、上海、广西污泥。各地污泥在 170℃ 水热处理下的物质溶解相比 150℃ 时大幅提高,这是由于 150℃ 热处理之后细胞壁破碎,胞内物质也开始发生溶解和

分解^[24]。对污泥溶解性固体物质的组分再进行细分,可以发现水热过程中转移到液相的物质以有机物(Volatile dissolved solid, VDS)为主,液相中无机固体(Fixed dissolved solid, FDS)的增加较少,同样说明水热处理对有机物的溶解效果更显著。

各地污泥的 VSS 溶解率随水热反应温度的变化如图 7 所示。不同污泥的 VSS 溶解率都随温度的升高极显著增加($P < 0.01$)。北京污泥的 VSS 溶解率相对较低,可能是因为污泥浓度大导致污泥传热传质性能不佳。上海和广西污泥在温度 130℃ 和 150℃ 之间增幅较小,这与北京和山东污泥的趋势不同。这可能是由两种原因造成的:上海和广西污泥

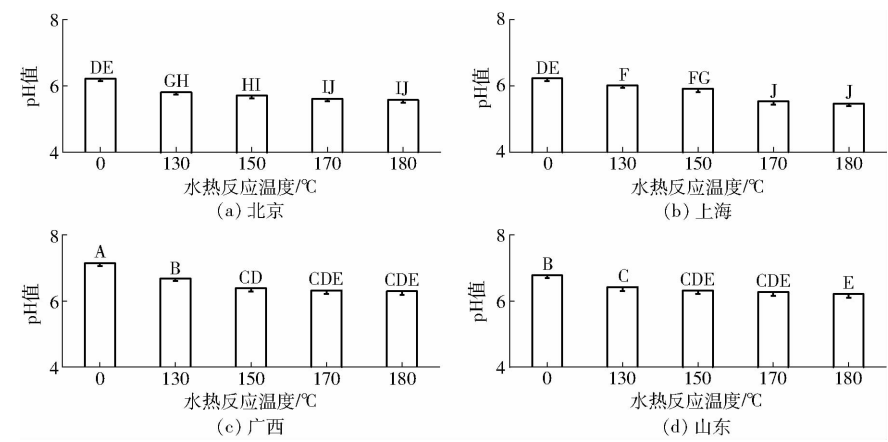


图 5 不同温度下水热反应后各污泥的 pH 值变化

Fig.5 pH value change of each sludge after hydrothermal treatment at different temperatures

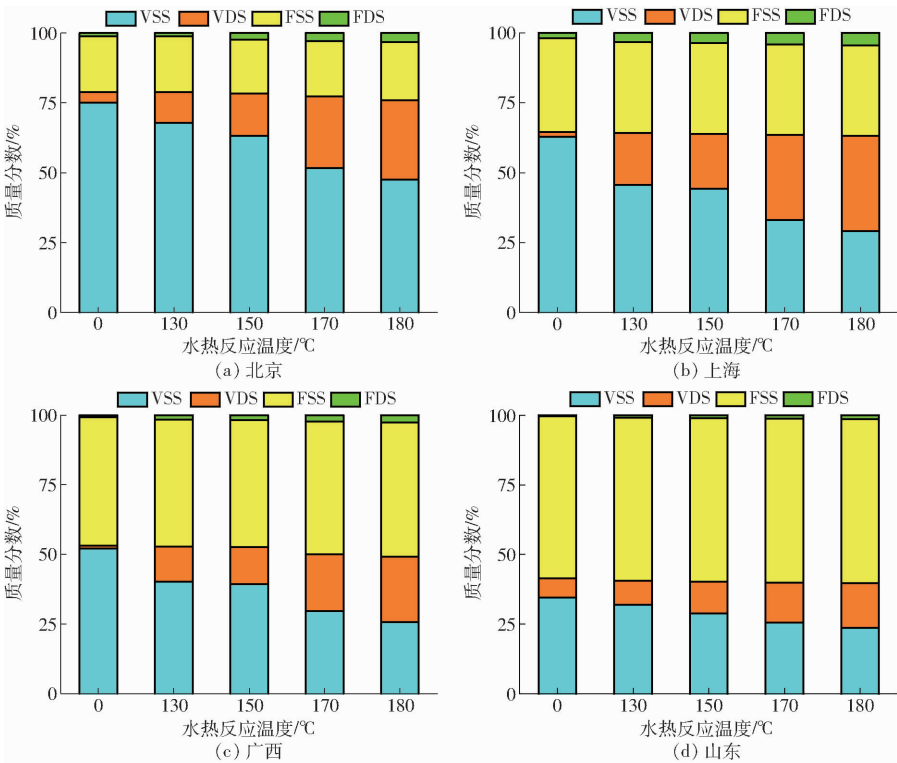


图 6 水热预处理对各污泥 TS 组分的影响

Fig.6 Effect of hydrothermal pretreatment on TS components of each sludge

中初沉污泥比例较小,文献[25]研究发现剩余活性污泥的胞外聚合物在高压灭菌环境下(121℃)即可被完全破坏;水热温度达到170℃以后,VSS溶解率进一步提升,可能是工业污水中部分耐高温有机物得到了充分溶解。

2.2 OLR对污泥厌氧消化性能的影响

2.2.1 沼气生成的促进作用

从表2可以看出,在近似的OLR下,各地污泥水热后的VS产气率都明显大于原泥厌氧消化的VS产气率($P < 0.05$),这与文献[26–27]的研究结果一致,各地污泥VS产气率随OLR增加无显著差异($P > 0.05$),但不同污泥的运行情况存在差异。北京污泥在5.1 g/(L·d)的OLR下仍能稳定运行,广

西和山东污泥在OLR为4.5 g/(L·d)时,原泥和水热泥反应器均酸败。对各地污泥的VS产气率进行综合对比,不同来源的污泥在未水热的情况下,其消化产气性能存在较大差异,北京原泥的厌氧消化产气性能远好于其他污泥,最高VS产气率可达675 mL/g,几乎是其他污泥产气率的2倍。这可能是因为北京污泥是由100%的生活污水经过A²/O工艺处理得到的。水热处理后的4种污泥在高负荷下的VS产气率仍明显高于原泥在低负荷下的产气率。各地污泥不同负荷下水热污泥VS产气率的增加比例各不相同,北京、上海、山东三地污泥VS产气率增加25.2%~69.8%,广西水热污泥VS产气率的增加比例高达101.6%~133.8%,这是由于广

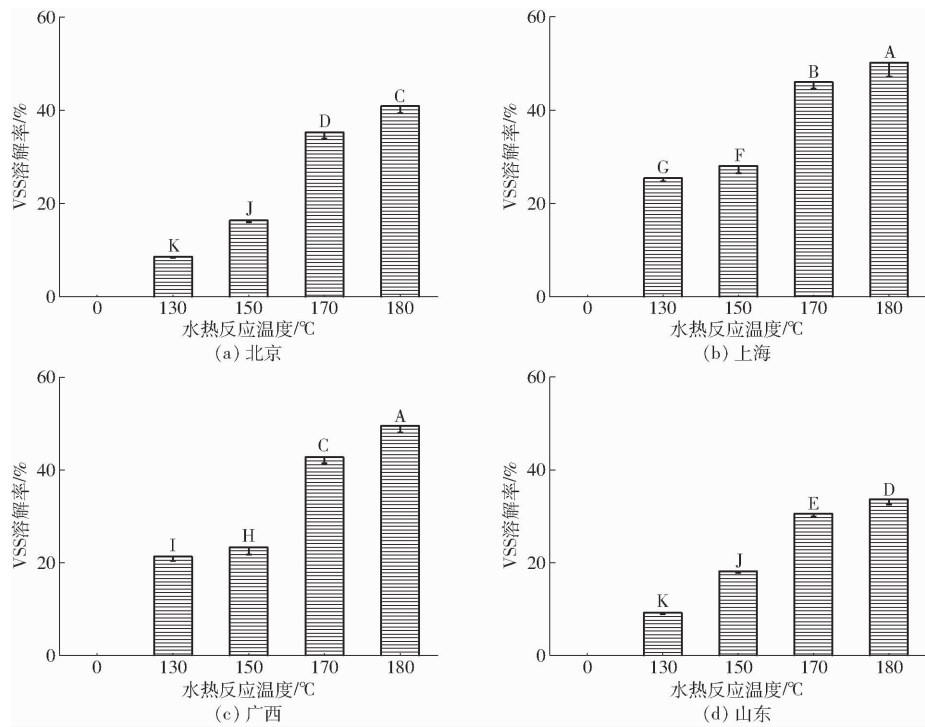


图 7 水热温度对各污泥 VSS 溶解率的影响

Fig. 7 Effect of hydrothermal temperature on VSS dissolution rate of each sludge

表 2 水热前后污泥的产气情况

Tab. 2 Gas production of sludge before and after hydrothermal treatment

泥源	OLR/ (g·(L·d) ⁻¹)	VS 产气率			
		原泥/ (mL·g ⁻¹)	水热泥/ (mL·g ⁻¹)	增加量/ (mL·g ⁻¹)	增加百分 比/%
北京	1.4	539 ± 19.3	675 ± 15.7	136	25.2
	2.5 ~ 2.6	527 ± 13.7	669 ± 13.5	142	26.9
	3.8	479 ± 18.3	634 ± 17.3	155	32.4
	5.1	409 ± 14.8	576 ± 12.7	167	40.8
上海	1.4 ~ 1.5	217 ± 19.5	347 ± 20.0	130	59.9
	2.6 ~ 2.7	192 ± 15.1	326 ± 15.7	134	69.8
	2.2 ~ 2.4	179 ± 15.6	397 ± 19.8	218	121.8
广西	2.6 ~ 2.7	142 ± 13.8	332 ± 14.9	190	133.8
	3.6 ~ 3.8	125 ± 12.3	252 ± 13.7	127	101.6
	4.5	酸败	酸败		
山东	2.5 ~ 2.6	292 ± 14.7	375 ± 15.6	83	28.4
	3.6 ~ 3.7	295 ± 13.9	381 ± 16.1	86	29.2
	4.5 ~ 4.6	酸败	酸败		

西的污水处理厂没有设置初沉池,其污泥为纯剩余污泥,而剩余污泥经热水解处理后的产气提升效果远大

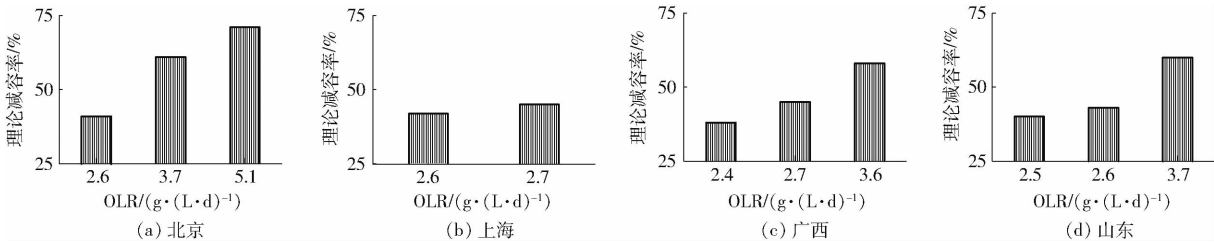


图 8 负荷提升后厌氧反应器理论减容率

Fig. 8 Theoretical capacity reduction rate of anaerobic reactor after load lifting

于初沉污泥^[28]。水热预处理后污泥 VS 产气率的绝对增加量却近似,水热后投加 1 t VS 产生的沼气的量增加 83 ~ 218 m³ (平均值 143 m³)。

2.2.2 厌氧反应器减容效果

污泥的粘度随着污泥固体浓度的升高而迅速变大,污泥流动性差,容易造成管道阻塞和搅拌困难,因此在实际工程中原泥的厌氧消化在高 OLR 下无法正常进行^[29]。北京高碑店污水处理厂在使用水热技术对污泥进行预处理之前,设计的进料 TS 质量分数仅有 6%,总水力停留时间 (Hydraulic retention time, HRT) 为 28 d,即 OLR 约 1.5 g/(L·d)。水热预处理促进污泥物质的溶解和水解,水热反应过程的高温高压环境有效地破坏污泥絮体和微生物细胞壁。污泥的粒径大幅变小,粘度下降达 96% ~ 99%,表现出良好的流动性。从表 2 可知各地水热泥在最高 OLR 下的 VS 产气率也明显高于原泥在最低 OLR 下的产气率,OLR 的提升可以实现厌氧反应器的减容,图 8 展示了各地污泥水热后在不同 OLR 下进料相对于原泥 OLR 为 1.5 g/(L·d) 的减容率,在近似的 OLR 下,不同污泥厌氧反应

器减容效果相近。水热后可节省反应器容积 38% ~ 71%。

3 结论

(1)同等水热温度处理下,污泥粘度、氨氮质量浓度、pH 值受污泥来源的影响较大。随着水热反应温度的升高,污泥粘度显著下降,氨氮质量浓度明显增加,pH 值显著降低。170℃水热处理对不同污泥具有普遍适用性,水热改性效果佳。

(2)各种污泥的 VS 产气率随 OLR 的提高均无显著性变化,但运行情况存在差异。100% 生活污水经 A²/O 工艺得到的污泥厌氧消化产气性能较好,最高

VS 产气率可达 675 mL/g,几乎是其他污泥产气率的 2 倍。

(3)不同污泥在水热预处理后的厌氧消化产气性能均明显提升,但受污泥自身产气性能影响,增加比例差异较大,北京、上海、山东三地污泥 VS 产气率增加 25.2% ~ 69.8%,由于广西污泥为纯剩余污泥,水热处理后 VS 产气率增加高达 101.6% ~ 133.8%。然而,不同来源污泥水热预处理后 VS 产气率的增加量相差不大,增加量为 83 ~ 218 m³/t (平均值 143 m³/t)。

(4)水热预处理后污泥流动性变好,可实现厌氧消化的高浓度、高负荷进料,反应器减容率可达 38% ~ 71%。

参 考 文 献

- [1] 黄惠莹. 国内剩余污泥厌氧消化强化处理研究进展[J]. 中国沼气, 2018, 36(4): 29 - 32.
HUANG Huiying. Research progress on strengthening anaerobic digestion of excess sludge[J]. China Biogas, 2018, 36(4): 29 - 32. (in Chinese)
- [2] 倪丙杰, 徐得潜, 刘绍根. 污泥性质的重要影响物质-胞外聚合物(EPS)[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 108 - 110, 121.
NI Bingjie, XU Deqian, LIU Shaogen. Extracellular polymeric substance (EPS) and its influence on properties of activated sludge[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(3): 108 - 110, 121. (in Chinese)
- [3] TIAN Y, ZHENG L, SUN D Z. Functions and behaviors of activated sludge extracellular polymeric substances (EPS): a promising environmental interest[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 18(3): 420 - 427.
- [4] ZHOU Y J, TAKAOKA M, WANG W, et al. Effect of thermal hydrolysis pre-treatment on anaerobic digestion of municipal biowaste: a pilot scale study in China[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2013, 116(1): 101 - 105.
- [5] 张万钦, 戚丹丹, 吴树彪, 等. 不同预处理方式对污泥厌氧发酵的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 187 - 198.
ZHANG Wanqin, QI Dandan, WU Shubiao, et al. Effect of different pretreatment methods on sewage sludge anaerobic digestion [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 187 - 198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140931&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 09. 031. (in Chinese)
- [6] LIAO X C, LI H, ZHANG Y Y, et al. Accelerated high-solids anaerobic digestion of sewage sludge using low-temperature thermal pretreatment[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 106: 141 - 149.
- [7] XUE Y G, LIU H J, CHEN S S, et al. Effects of thermal hydrolysis on organic matter solubilization and anaerobic digestion of high solid sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 264: 174 - 180.
- [8] 郭思宇, 彭永臻, 李夕耀, 等. 热处理对剩余污泥中温厌氧消化的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2106 - 2113.
GUO Siyu, PENG Yongzhen, LI Xiyao, et al. Effect of thermal hydrolysis pretreatment on mesophilic anaerobic digestion of excess sludge[J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2106 - 2113. (in Chinese)
- [9] 曾祖刚. 热水解工艺在协同厌氧处置技术中的应用[J]. 能源与节能, 2017(11): 96 - 97.
ZENG Zugang. Application of thermal hydrolysis process in coordinated anaerobic treatment technology[J]. Energy and Energy Conservation, 2017(11): 96 - 97. (in Chinese)
- [10] 周国亚, 李贺, 殷锡芬. 不同性质污泥的电渗透脱水分析[J]. 广东化工, 2017, 44(3): 122 - 123, 150.
ZHOU Guoya, LI He, YIN Xifen. Electroosmosis dewatering analysis of sludge with different properties [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(3): 122 - 123, 150. (in Chinese)
- [11] 常会庆, 焦常峰, 郑彩杰, 等. 不同来源污泥重金属的含量特征及其风险评价[J]. 河南农业科学, 2019, 48(3): 70 - 76.
CHANG Huiqing, JIAO Changfeng, ZHENG Caijie, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal content in sewage sludge from different sources[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(3): 70 - 76. (in Chinese)
- [12] 国家环境保护总局. 《水和废水监测分析方法》[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 张鹏, 吴志超, 敖华军. 污泥的粘度与浓度、温度三者关系式的实验推导[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006(3): 72 - 74.
ZHANG Peng, WU Zhichao, AO Huajun. Experimental deduction of the relationship between sludge viscosity, concentration and temperature[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006(3): 72 - 74. (in Chinese)
- [14] MARKIS F, BAUDEZ J C, PARTHASARATHY R, et al. The apparent viscosity and yield stress of mixtures of primary and secondary sludge: impact of volume fraction of secondary sludge and total solids concentration[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 288: 577 - 587.
- [15] URREA J L, COLLADO S, LACA A, et al. Rheological behaviour of activated sludge treated by thermal hydrolysis[J]. Journal of Water Process Engineering, 2015, 5: 153 - 159.

- [16] HIGGINS M, BEIGHTOL S, MANDAHAR U, et al. Effect of thermal hydrolysis temperature on anaerobic digestion, dewatering and filtrate characteristics[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2014, 15: 2027 – 2037.
- [17] 韩芸, 王晓飞, 卓杨, 等. 预处理条件对高含固污泥热水解有机物组分转化的影响[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4): 1527 – 1532.
HAN Yun, WANG Xiaofei, ZHUO Yang, et al. Impact of the pretreating conditions on the conversion of the organic compounds in the THP of the high solid sludge[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(4): 1527 – 1532. (in Chinese)
- [18] LU H W, XIAO S, LE T, et al. Evaluation of solubilization characteristics of thermal hydrolysis process[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2014, 15: 6312 – 6336.
- [19] 程海磊. 热水解影响污泥物理及生化特性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
CHENG Hailei. Research on the physics and biochemical characteristics of thermal pre-treatment sludge[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [20] DWYER J, STARRENBURG D, TAIT S, et al. Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability[J]. Water Research, 2008, 42(18): 4699 – 4709.
- [21] 程瑶, 韩芸, 卓杨, 等. 温度对热水解预处理高含固污泥特性的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 330 – 334.
CHENG Yao, HAN Yun, ZHUO Yang, et al. Effect of temperature on characteristics of thermal hydrolysis pretreatment of high-solid sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 330 – 334. (in Chinese)
- [22] 粮时光, 张健, 王双飞, 等. 剩余污泥热水解厌氧消化中试研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 431 – 435.
LANG Shiguang, ZHANG Jian, WANG Shuangfei, et al. Pilot-scale study on thermal hydrolysis and anaerobic digestion of excess sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1): 431 – 435. (in Chinese)
- [23] 王治军, 王伟. 污泥热水解过程中固体有机物的变化规律[J]. 中国给水排水, 2004, 20(7): 1 – 5.
WANG Zhijun, WANG Wei. Transformation regularity of organic solids in sludge thermal hydrolysis process[J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(7): 1 – 5. (in Chinese)
- [24] 卓杨, 韩芸, 程瑶, 等. 高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1006 – 1012.
ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, et al. Transformation characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur during thermal hydrolysis pretreatment of sludge with high solid content[J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 1006 – 1012. (in Chinese)
- [25] BARJENBRUCH M, KOPFLOW O. Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge[J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7(3): 715 – 720.
- [26] OOSTERHUIS M, RINGOOT D, HENDRIKS A, et al. Thermal hydrolysis of waste activated sludge at Hengelo wastewater treatment plant[J]. Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2014, 70(1): 1 – 7.
- [27] 宋晓雅. 污泥热水解厌氧消化与常规厌氧消化的运行比较[J]. 给水排水, 2019, 55(3): 26 – 30.
SONG Xiaoya. Comparison of operation between thermal hydrolysis anaerobic digestion and conventional anaerobic digestion [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(3): 26 – 30. (in Chinese)
- [28] BARBER W. Thermal hydrolysis for sewage treatment: a critical review[J]. Water Research, 2016, 104: 53 – 71.
- [29] JIANG J, WU J, PONCIN S, et al. Rheological characteristics of highly concentrated anaerobic digested sludge[J]. Biochemical Engineering Journal, 2014, 86: 57 – 61.