

热水解预处理对高含固污泥流变特性的影响

王磊¹, 谭学军¹, 王逸贤¹, 郑舍予²

(1. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 华东理工大学 资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: 研究了高温热水解预处理对高含固污泥流变特性的影响规律。结果表明,污泥黏度随着含固率的提高而呈现指数增加趋势,当含固率 $<10\%$ 时,污泥黏度的增加较为缓慢;而当含固率 $>10\%$ 时,污泥黏度随含固率的提高而急剧增加。热水解前后污泥黏度均随着剪切速率的提高而减小,呈现出剪切变稀特性。剪切应力随剪切速率的变化规律符合 Herschel-Bulkley 模型,且流型指数均小于 1,表明污泥为假塑性非牛顿流体。在所有含固率梯度下,热水解后污泥黏度均低于热水解前,尤其在含固率 $>10\%$ 时,热水解对污泥黏度的降低作用非常显著。热水解后污泥屈服应力降低幅度均达到 80% 以上。

关键词: 高含固污泥; 流变特性; 热水解预处理; 黏度; 剪切速率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0089-06

Impacts of Thermal Hydrolysis Pretreatment on Rheological Characteristics of High Solid Content Sludge

WANG Lei¹, TAN Xue-jun¹, WANG Yi-xian¹, ZHENG She-yu²

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China;
2. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Impacts of thermal hydrolysis pretreatment on rheological characteristics of high solid content sludge were investigated. The results showed that the sludge viscosity increased exponentially with the raising of the solid content—it increased slowly when solid content was below 10%, but increased rapidly when the solid content was above 10%. The sludge viscosity decreased under higher shearing rate, and showed shear-thinning characteristics. The rule of shear stress and shear rate conformed to the Herschel-Bulkley model, and all the fluid pattern indexes were less than 1, which indicated the non-Newtonian pseudo-plastic fluid. The viscosity of sludge after thermal hydrolysis pretreatment was lower than that of the sludge before pretreatment under all the solid content gradients, and thermal hydrolysis significantly reduced sludge viscosity when the solid content was higher than 10%. Sludge yield stress decreased more than 80% after thermal hydrolysis pretreatment.

Key words: high solid content sludge; rheological characteristics; thermal hydrolysis pretreatment; viscosity; shearing rate

随着我国城镇污水收集率的提高和污水处理厂建设的快速发展,伴随产生的污泥量也相应急剧增加。厌氧消化处理是实现污泥稳定化和资源化的重要方式,通过提高厌氧消化进泥的含固率,可以提高消化池的容积负荷,降低消化池体积和污泥加热能耗,进而降低污泥厌氧消化设施的建设和运行成本^[1]。但是随着含固率的提高,污泥黏度相应增加,污泥流变特性也会发生变化,导致污泥输送过程能耗高、输送管道容易堵塞、消化池内传质与传热不均匀等现象^[2]。

热水解是污泥厌氧消化的主要预处理技术之一,近年来在国内外得到了日益广泛的关注和应用。然而,目前关于污泥热水解预处理的研究主要聚焦于对有机物降解率和产气效率的提高方面,针对热水解对高含固污泥流变特性影响的研究较少^[3-4]。本研究对高含固污泥(将脱水污泥适当稀释后的含固率较高的污泥)进行高温热水解,考察热水解预处理对污泥流变特性的影响规律,并对试验数据进行模型拟合与分析,以期对污泥厌氧消化处理设施的科学与运行优化提供技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用污泥取自上海市某污水处理厂的污泥离心脱水机房,为初沉污泥和剩余污泥的混合物,含固率为22.93%,有机物含量为47.38%。

污泥热水解反应器为不锈钢反应釜,配置有聚四氟乙烯内胆,有效体积为500 mL,加热方式为外加热,升温 and 降温速率 $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,温度升至 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后恒温反应1 h,然后自然冷却至室温。

脱水污泥经热水解处理可得到热水解污泥,黏度检测时采用蒸馏水将脱水污泥和热水解污泥稀释至所需含固率。

1.2 试验方案

研究含固率对污泥流变特性的影响时,用蒸馏水将污泥稀释至不同含固率梯度(5%、7.5%、10%、12.5%和15%),在室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下测定污泥黏度,固定转子转速为 50 r/min 、剪切速率为 46.5 s^{-1} ,该剪切速率可以认定为层流^[5]。

研究剪切速率对污泥流变特性的影响时,固定污泥含固率为10%,在室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下通过由低到高的剪切速率测定污泥黏度,绘制黏度曲线。

研究污泥触变性时,固定污泥含固率为10%,

设定剪切速率从 0.047 s^{-1} 逐渐升高至 186 s^{-1} 并保持5 min,然后再逐渐降低至 0.047 s^{-1} ,获得剪切应力-剪切速率的上升曲线和下降曲线。其中,屈服应力为剪切速率趋近于零时所对应的剪切应力值。

1.3 检测项目与方法

黏度利用HBDV-II+Pro型旋转黏度计测定,配备RTD温度探头(精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$),以及21#、27#、28#、29#共4个转子用于测定不同黏度的流体,转子的转速范围为 $0.05\sim 200\text{ r/min}$,对应的剪切速率(γ)范围为 $0.047\sim 186\text{ s}^{-1}$ 。本研究选用29#转子,以使污泥黏度位于黏度计量程范围内。

污泥含固率、有机物含量等泥质指标的检测采用行业标准《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)中的相应方法。

2 结果与讨论

2.1 含固率对污泥黏度的影响

污泥的黏度随剪切时间的增加而降低,并逐渐趋于稳定^[6]。因此,本研究中不同含固率梯度下污泥黏度的取值均为黏度降低趋势基本稳定时所对应的极限值。在剪切速率为 46.5 s^{-1} 条件下,污泥黏度随含固率的变化曲线如图1所示。

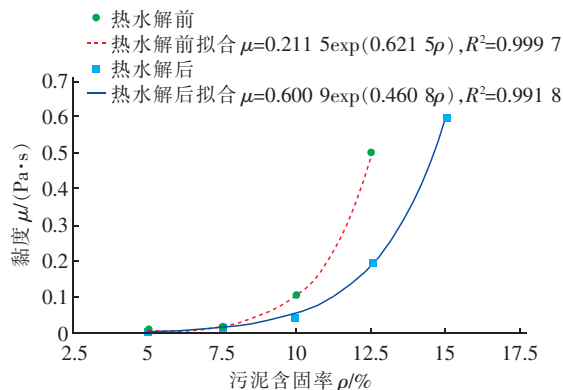


图1 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时污泥黏度随含固率的变化及拟合曲线

Fig.1 Change of sludge viscosity with solid content at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and its fitting curve

由图1可知,当含固率较低时,污泥的黏度也较低,接近于水的黏度;随着含固率的提高,污泥黏度逐渐增加。当含固率 $<10\%$ 时,污泥黏度的增加较为缓慢;而当含固率 $>10\%$ 时,污泥黏度随含固率的提高而急剧增加。对热水解前后污泥黏度与含固率的关系进行模型拟合,发现黏度与含固率之间呈指数关系,表征拟合优度的 R^2 均达到0.99以上。含固率影响污泥黏度的机理可能有两个方面:①污泥

颗粒数目随着含固率的提高而增多,颗粒之间形成网状结构的趋势增强,限制了污泥的流动性^[7];②污泥颗粒之间的距离随着含固率的提高而变小,颗粒之间的范德华力增强,黏度也相应提高^[8]。

在不同含固率梯度下,热水解后污泥的黏度均低于热水解前,且含固率较高时热水解后黏度随含固率增加的趋势比热水解前更为平缓。这表明热水解预处理有利于降低污泥黏度,尤其在含固率 > 10% 时,热水解对污泥黏度的降低作用非常显著(见图1)。这可能是由于高温高压条件下大分子有机物分解为小分子有机物,改变了污泥絮体结构,进而影响了污泥的流变特性。

2.2 剪切速率对污泥黏度的影响

热水解前后污泥(含固率为10%)黏度随剪切速率的变化曲线见图2。

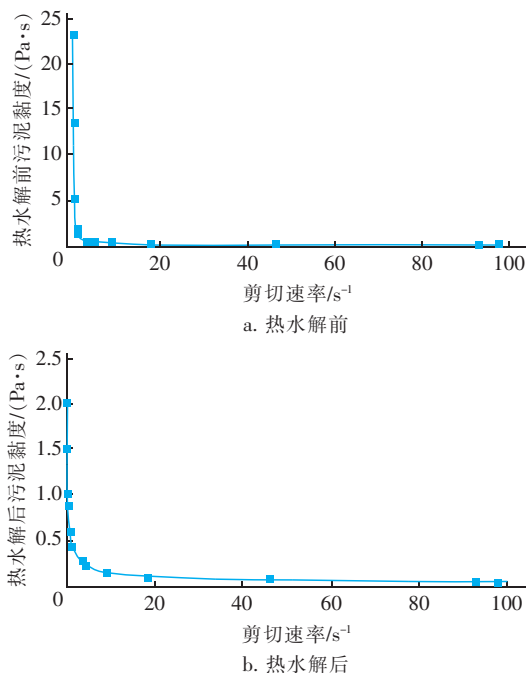


图2 25 °C 时污泥(含固率为10%)黏度随剪切速率的变化曲线

Fig. 2 Change of sludge viscosity with shear rate at 25 °C (solid content of 10%)

热水解前后污泥黏度均随着剪切速率的提高而减小,并在低剪切速率($\gamma < 3.72 \text{ s}^{-1}$)时随着剪切速率的增大而迅速下降;随着剪切速率继续增大,污泥黏度的降低幅度减小,最后趋于稳定。因此,对于厌氧消化反应器,宜根据污泥黏度与剪切速率的变化规律合理选择搅拌速度。在能耗合理的条件下,适当提高搅拌速率,有利于降低污泥的黏度,提高污泥

的流动性。另外,对应每个剪切速率,热水解后的污泥黏度均低于热水解前,而且黏度值趋于稳定的速度也更快。

2.3 热水解后污泥流变模型的拟合

由图2可知,污泥黏度随剪切速率的变化而变化,因此仅以黏度表征污泥流变特性具有局限性,应结合模型方程来描述污泥的流变性质。Herschel - Bulkley 模型适用于拟合有屈服应力的流变曲线,可用于描述污泥的流变特性^[9]。

Herschel - Bulkley 模型的表达式为:

$$\tau = \tau_0 + K\gamma^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; τ_0 为屈服应力, Pa; K 为黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; γ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流体的流型指数,无量纲, $n = 1$ 为牛顿流体, $n < 1$ 为假塑性流体, $n > 1$ 为膨胀性流体。

热水解前后污泥剪切力随剪切速率的变化趋势以及基于 Herschel - Bulkley 模型的拟合曲线见图3。表征拟合优度的 R^2 均在 0.99 以上,流体的流型指数分别为 0.85 和 0.51,均小于 1,表明污泥为假塑性非牛顿流体,与曹秀芹等^[4]所得出的规律一致。在不同剪切速率下,热水解后污泥的剪切应力均显著低于热水解前。

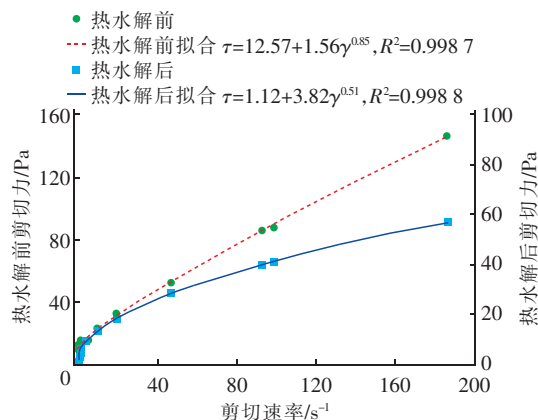


图3 25 °C 时污泥剪切力随剪切速率的变化及拟合曲线

Fig. 3 Change of sludge shear force with shear rate at 25 °C and its fitting curve

屈服应力是指能使流体开始连续性流动所需施加的最小应力值,反映了流动性的差异。热水解前后污泥屈服应力变化如表1所示。可以看出,在不同含固率条件下,热水解后污泥屈服应力降低幅度均达到80%以上。屈服应力降低,不仅可以降低污泥输送和搅拌的能耗,还有利于破除厌氧消化池内污泥结壳^[4]。

表1 热水解前后污泥屈服应力比较

Tab.1 Comparison of yield stress of sludge before and after thermal hydrolysis

污泥含固率/%	10	12.5	15
热水解前污泥屈服应力/Pa	10.7	107.4	180
热水解后污泥屈服应力/Pa	0.9	18.6	27.4
热水解后污泥屈服应力降低比例/%	91.3	82.7	84.8

2.4 热水解后污泥的触变性特征

热水解后污泥(含固率为10%)的剪切应力-剪切速率曲线如图4所示。剪切应力-剪切速率曲线由剪切速率升高时的上升曲线和剪切速率降低时的下降曲线组成。上升曲线与下降曲线不重合,形成了顺时针方向的滞后环,说明热水解预处理后污泥仍然为时间相关性流体,剪切速率升高过程对污泥流变性产生了不可逆的影响。滞后环的面积常用来表征流体触变性的差异,王彦祥等^[6]研究发现污泥含固率越高,滞后环面积越大,触变性也越强。

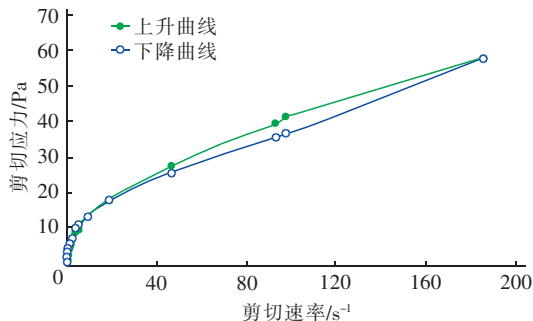


图4 热水解后污泥(含固率为10%)的剪切应力-剪切速率曲线

Fig.4 Shear stress - shear rate curve of sludge (solid content of 10%) after thermal hydrolysis

曹秀芹等^[4]研究发现,热水解可以显著降低污泥的触变性,热水解后污泥的触变性动力学系数由 $0.032\ 2\ s^{-1}$ 降低至 $0.013\ 7\ s^{-1}$,这可能与热水解后污泥颗粒粒径变小有关。图4中热水解后污泥滞后环面积较小,表明热水解处理后污泥的触变性较弱,进入厌氧消化池后不易产生因触变性导致的污泥聚集甚至形成死区的现象,更有利于消化池内的传质和传热。

2.5 污泥流变特性对厌氧消化系统设计的影响

污泥流变特性与输送、搅拌、传质和传热等环节密切相关^[10],对污泥厌氧消化系统中含固率、搅拌速度、搅拌能耗等工艺指标的科学设计与计算具有重要意义。

① 污泥含固率

含固率是影响污泥流变特性的最主要因素^[11],本研究考察了不同含固率(5%~15%)条件下污泥黏度的变化规律,发现黏度随含固率的提高而呈现指数增加的趋势,当污泥含固率<10%时,黏度的增加较为缓慢;而当污泥含固率>10%时,黏度随含固率的提高而急剧增加。马俊伟等^[3]也发现了类似的规律,当污泥含固率<9%时,屈服应力增长缓慢;当污泥含固率>9%时,屈服应力急剧增长。黏度和屈服应力直接反映了流体的流动性,故可以推断含固率为9%~10%可能是污泥流动性的突变点,当污泥的含固率大于突变点时,流动性迅速变差,不利于输送和搅拌。综合考虑污泥的流变特性和工程的经济效益,采用高含固厌氧消化工艺时污泥的含固率宜为9%~10%。此外,热水解预处理可以显著降低污泥黏度,为提高污泥厌氧消化的含固率提供了可能。

② 搅拌速度

剪切应力倾向于破坏污泥结构,污泥颗粒间的凝聚力倾向于恢复污泥结构,在临界状态时,污泥结构被完全破坏,污泥发生流动。由图2可知,污泥属于剪切变稀的非牛顿流体,黏度随剪切速率增大而减小,剪切速率越大,黏度越小,流动性越好。因此,为了保证污泥的流动性,需要使剪切速率维持在一定水平之上。对于污泥输送系统,如果管道内的剪切速率不够高,会使污泥难以维持均质流并可能导致管道堵塞;对于厌氧消化系统,如果搅拌强度不够或者污泥长时间静置,会导致污泥结构重建形成死区,严重影响消化池有效体积。

但是,污泥剪切速率也不宜过大,还应综合考虑能耗、剪切效果等因素。由图2、3可知,对于含固率为10%的污泥,当剪切速率 $\gamma < 3.72\ s^{-1}$ 时,污泥黏度随剪切速率的提高而急剧降低;但当 $\gamma > 3.72\ s^{-1}$ 时,继续提高剪切速率,污泥黏度降低幅度不大,对应的剪切应力却逐渐增大,搅拌能耗也相应增加。此外,如果搅拌过于剧烈则会影响微生物的絮凝作用,抑制微生物代谢,不利于反应器的稳定运行^[12]。在不同含固率和温度条件下,污泥黏度随剪切速率变化的趋势存在差异,实际工程中在设计污泥输送流速和搅拌速度时,应结合污泥流变特性曲线进行分析。

③ 搅拌能耗

对于均相液体搅拌过程,搅拌器的功率(P)是

流体密度 ρ' 、黏度 μ 、搅拌器转速 N 、搅拌器直径 d 的函数,如公式(2)所示^[12]。

$$\frac{P}{\rho' N^3 d^5} = \varphi\left(\frac{\rho' N d^2}{\mu}\right) \quad (2)$$

在低搅拌雷诺数 ($Re_M < 10$) 的层流区内,搅拌功率计算公式可简化为公式(3)^[13]。

$$P = C \mu N^2 d^3 \quad (3)$$

由公式(3)可知,在层流状态下,搅拌功率与污泥的黏度成正比,黏度越高,搅拌功率越大。当含固率 $< 7.5\%$ 时,热水解前后污泥黏度差别不大;但当含固率 $> 10\%$ 时,热水解后污泥黏度比热水解前降低 50% 以上(见图1),可显著降低厌氧消化设施运行成本。此外,上述功率仅为正常运转时桨叶向流体提供的功率,由于污泥具有剪切变稀的特性,实际搅拌器在调试阶段启动时或者间歇运行重启时,所需要的功率比正常运转功率大,含固率越高差别越显著,在搅拌电机选型时应予以注意。

3 结论

① 污泥黏度随含固率的提高而呈现指数增加趋势,当含固率 $< 10\%$ 时,污泥黏度的增加较为缓慢;而当含固率 $> 10\%$ 时,污泥黏度随含固率的提高而急剧增加。

② 热水解前后污泥(含固率为 10%)的黏度均随剪切速率的提高而减小,并在低剪切速率 ($\gamma < 3.72 \text{ s}^{-1}$) 下随剪切速率的增大而迅速下降;随着剪切速率继续增大,污泥黏度降低幅度减小,最后趋于稳定。

③ 热水解前后污泥剪切力随剪切速率的变化规律均符合 Herschel - Bulkley 模型,模型拟合结果中流体的流型指数均小于 1,表明污泥为假塑性非牛顿流体。

④ 在不同含固率梯度下,热水解后污泥黏度均低于热水解前,尤其在含固率 $> 10\%$ 时,热水解对污泥黏度的降低作用非常显著,热水解后污泥屈服应力降低幅度均达到 80% 以上。

参考文献:

[1] 王广启,吴静,左剑恶,等. 城市污泥高固体浓度厌氧消化的研究进展[J]. 中国沼气,2013,31(6):9-12.
Wang Guangqi, Wu Jing, Zuo Jian'e, et al. Progress of high-solid-content anaerobic digestion of municipal

sludge[J]. China Biogas, 2013, 31(6):9-12 (in Chinese).

[2] 盛迎雪,曹秀芹. 高固体污泥厌氧消化技术特点及存在问题分析[J]. 北京建筑大学学报,2016,32(2):41-44.

Sheng Yingxue, Cao Xiuqin. Analysis on technological characteristics and existing problems of high-solids anaerobic digestion[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016, 32(2):41-44 (in Chinese).

[3] 马俊伟,曹芮,周刚,等. 浓度对高固体污泥热水解特性及流动性的影响[J]. 环境科学,2010,31(7):1583-1589.

Ma Junwei, Cao Rui, Zhou Gang, et al. Effect of solid content on thermal hydrolysis characteristics and flowability of high solid content sewage sludge[J]. Environmental Science, 2010, 31(7):1583-1589 (in Chinese).

[4] 曹秀芹,王鑫,蒋竹荷,等. 高含固污泥在热水解-厌氧消化工艺中的流变特性分析[J]. 环境工程学报,2017,11(4):2493-2498.

Cao Xiuqin, Wang Xin, Jiang Zhuhe, et al. Analysis on rheological characterization of high solid sludge in process of thermal hydrolysis-anaerobic digestion[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(4):2493-2498 (in Chinese).

[5] Pevere A, Guibaud G, van Hullebusch E, et al. Identification of rheological parameters describing the physico-chemical properties of anaerobic sulphidogenic sludge suspensions[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007, 40(4):547-554.

[6] 王彦祥,何琴,李蕾,等. 餐厨垃圾中温干式厌氧消化污泥的流变特性研究[J]. 环境科学学报,2014,34(12):3171-3178.

Wang Yanxiang, He Qin, Li Lei, et al. Rheological characteristic analysis of dry anaerobic digestion sludge of food waste under mesophilic conditions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12):3171-3178 (in Chinese).

[7] Jiang J K, Wu J, Poncin S, et al. Rheological characteristics of highly concentrated anaerobic digestion sludge[J]. Biochemical Engineer Journal, 2014, 86:57-61.

[8] Abu-Jdayil B, Banat F, Al-Sameraiy M. Steady rheological properties of rotating biological contactor (RBC) sludge[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2010, 2(1):1-7.

(下转第98页)