

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.018

餐厨垃圾湿法厌氧处理的污泥流变性特征及其成因

梁玉帅^{1,2}, 王侃宏², 徐宇峰^{1,2,3}, 刘吉宝^{1,3,4}, 郁达伟^{1,3,4},
祝金星⁵, 陈梅雪^{1,3,4}, 魏源送^{1,3,4}, 李 娇⁵, 樊 华⁵

(1. 中国科学院生态环境研究中心 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085; 2. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056000; 3. 中国科学院生态环境研究中心 水污染控制实验室, 北京 100085; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 北京环卫集团环境研究发展有限公司, 北京 100101)

摘 要: 餐厨垃圾厌氧处理的污泥流变性是影响厌氧处理反应器混合能耗的重要因素,但是污泥浓度影响流变性的机制尚不明确。为此,采集北京市某餐厨垃圾综合处理厂的湿法厌氧处理污泥,考察了污泥粒径分布、溶解态有机物组分和温度等因素对污泥流变性的影响。结果表明,升温对污泥上清液和TS含量为2%~6%的污泥流变性起到了促进作用,升温可使颗粒物水解成小分子有机物,从而导致流变性增强。当 $TS \leq 2\%$ 时,污泥的流变性主要由溶解态有机物贡献,芳香类蛋白质Ⅱ转化为芳香类蛋白质Ⅰ导致屈服应力 τ_0 降低;当 $TS \geq 4\%$ 时,污泥流变性主要由颗粒物贡献,屈服应力 τ_0 提高而稠度指数 k 降低,粒径分布较稳定;当温度 $>80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,蛋白质变性导致屈服应力 τ_0 明显升高,但稠度指数 k 明显降低。

关键词: 餐厨垃圾; 湿法厌氧处理; 污泥流变性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0117-09

Rheological Characteristics of Sludge from Wet Anaerobic Digestion of Kitchen Waste and Its Causes

LIANG Yu-shuai^{1,2}, WANG Kan-hong², XU Yu-feng^{1,2,3}, LIU Ji-bao^{1,3,4},
YU Da-wei^{1,3,4}, ZHU Jin-xing⁵, CHEN Mei-xue^{1,3,4}, WEI Yuan-song^{1,3,4}, LI Jiao⁵,
FAN Hua⁵

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China; 3. Laboratory of Water Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Beijing Environmental Research and Development Co. Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: The rheology of anaerobic digested sludge is an important factor affecting the mixed energy consumption of anaerobic digester for kitchen waste. However, mechanism of the effect of sludge

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100600)

通信作者: 郁达伟 E-mail: dwyu@rcees.ac.cn

concentration on rheology is still unclear. In this paper, the sludge from wet anaerobic digestion was collected from a comprehensive kitchen waste treatment plant in Beijing, and the effects of sludge particle size distribution, dissolved organic compounds and temperature on sludge rheology were investigated. Temperature rise promoted the rheology of sludge supernatant and sludge with TS content of 2%–6%, and hydrolyzed particulate matter into small molecular organic matter, resulting in increased rheology. When TS was no more than 2%, the rheology of sludge was mainly contributed by dissolved organic compounds, and the yield stress τ_0 was reduced by the conversion of aromatic protein II to aromatic protein I. When TS was greater than 4%, the rheology of sludge was mainly contributed by particulate matter, the yield stress τ_0 increased, the viscosity index k decreased, and the particle size distribution was relatively stable. When the temperature was greater than 80 °C, the yield stress τ_0 increased obviously due to protein denaturation, but the viscosity index k decreased obviously.

Key words: kitchen waste; wet anaerobic digestion; sludge rheology

与全球餐厨垃圾相比,我国餐厨垃圾具有高含水率(湿基,78%~90%)、高盐分(湿基,0.5%~3%)、高有机物含量(干基,蛋白质为13%~27%、碳水化合物为55.2%~61.9%)和高油脂(干基,4.6%~42%)等特点^[1],适于厌氧处理。近年来,我国政府陆续支持建设了一批餐厨垃圾处理处置工程,并逐渐形成了以厌氧处理为主的工艺路线体系,主要采用湿式厌氧发酵工艺^[2]。改善物料流变性有助于改善混合条件,从而提高厌氧处理反应器的性能^[3]。餐厨垃圾含固率高(湿基,10%~25%)、溶解态有机物含量高导致流变性变化较大,有必要进一步明确其影响机制,从而改善流变性、提高厌氧处理性能。

厌氧处理污泥的流变性主要随物料特性、消化过程和温度而变化^[4],其中溶解态有机物和颗粒物质是影响污泥流变性的的重要因素^[5-6]。污泥含固率较高时,颗粒物质是其流变性的主要影响因素;随着含固率的降低,溶解态有机物逐渐成为流变性的主要影响因素。例如,污泥含固率为3.5%~7.7%时,可溶性有机物越多,污泥的屈服应力与表观黏度越低^[7]。预处理可以改变污泥形态和溶解态有机物占比,从而显著影响流变性。Liu等人^[8]采用微波/ H_2O_2 预处理含固率为7.88%的污泥,溶解性COD(SCOD)从(4 224±17) mg/L增加到(38 520±5 221) mg/L,使污泥的屈服应力从54.51 Pa下降到11.08 Pa,不仅增强了污泥流动性,而且提高了甲烷产率。Dai等人^[9]的研究显示,当脱水污泥含固率为16.16%时,随着污泥龄(SRT)的延长,剪切应力、黏度、屈服应力和稠度指数逐渐降低,流动性能指数

升高。王彦祥^[10]的研究表明,对于TS>20%的餐厨垃圾,随着TS的增加,污泥黏度逐渐增大,流动性变差,推测是污泥中颗粒物含量增加导致污泥颗粒之间的相互作用增强所致。也有研究表明,厌氧处理过程中,污泥流变特性的变化主要与消化程度有关,含固率的影响不显著^[11]。上述研究表明,影响污泥流变性的关键因素是污泥中的颗粒态和溶解态物质,不同预处理、厌氧处理过程都能够改善污泥流变性;但随着SRT延长等工艺条件变化,污泥流变性又可能变差。餐厨垃圾的流变性处于从溶解态物质控制到颗粒态物质控制的过渡区间,有必要加强关注。

厌氧处理污泥的流变性主要呈现非牛顿流体特征^[12],具有屈服应力值可变、剪切稀化和依时性等特点。可以通过模型定量描述流体特性与剪切速率等流动特征之间的关系,常用的模型有幂律模型、Bingham模型、Herschel-Bulkley模型(简称“H-B模型”)等。对于厌氧污泥混合液,幂律模型符合常见的流变规律,适于模拟污泥悬浮液流变曲线的剪切稀化区^[13],但它无法预测低剪切速率和高剪切速率下的恒定黏度。Bingham模型和Herschel-Bulkley模型能够在污泥流动之前和开始流动时描述污泥的流动特征,适于描述和分析反应器的流动死区。但Bingham模型不能有效地描述污泥的整体流变特性,特别是在固体含量较高的情况下^[14]。Herschel-Bulkley模型是一种非线性Bingham模型,采用幂律表达式代替Bingham模型中的塑性黏度项,从而能够更准确地描述污泥假塑性或剪切稀化特性以及

屈服应力^[13]。

因此,笔者以餐厨垃圾湿式厌氧发酵工艺为研究对象,通过现场采集北京某餐厨垃圾处理工程的厌氧处理污泥,考察餐厨湿法厌氧处理污泥的流变性特征和影响因素,并分析污泥流变性的成因,以期餐厨垃圾厌氧处理提质增效提供科学依据。

1 实验材料和方法

1.1 样品采集与预处理

1.1.1 样品采集

北京市某餐厨垃圾综合处理厂的设计规模为930 t/d,其中分选垃圾为150 t/d,干法厌氧处理餐厨垃圾为380 t/d,湿法厌氧处理餐厨垃圾为400 t/d。湿法厌氧处理采用37℃中温厌氧处理,工艺流程见图1。实验样品取自餐厨垃圾湿法厌氧处理1号罐底部。采集的样品用冰袋冷藏和运输。

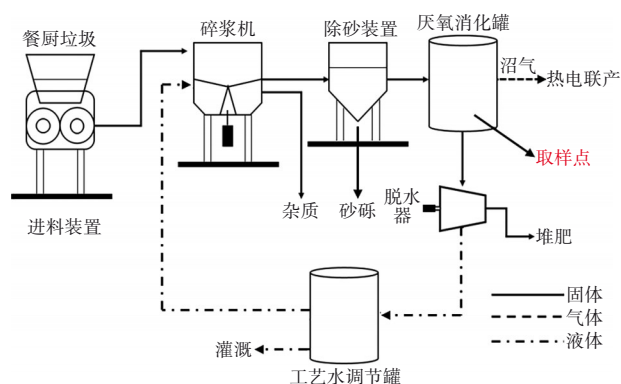


图1 工艺流程及采样点示意

Fig.1 Schematics of process flow and sampling points

1.1.2 样品预处理

为避免污泥样品中大颗粒物质对流变测试产生影响,将污泥过100目筛去除大颗粒物质。过筛后,测定污泥的pH和电导率。样品的主要理化特性参数如下:TS为(3.76±0.02)%,VS/TS为(57.4±0.01)%,pH为7.74±0.05,氨氮为(1.95±0.16) mg/L,TOC为(3770.50±232.99) mg/L,多糖为(16.83±4.84) mg/L,蛋白质为(57.29±0.63) mg/L,电导率为(32.25±0.07) mS/cm。

将过筛后的污泥样品离心(3500 r/min, 10 min)分离浓缩污泥和上清液。将浓缩污泥加去离子水稀释,得到TS含量分别为2%、4%和6%的污泥样品,用于考察不同污泥浓度对流变的影响;将上清液用于分析溶解态有机物对流变的影响。所有样品设置两个平行。

1.2 污泥流变性分析

采用旋转流变仪进行污泥流变性的分析,该流变仪的转子半径为13.331 mm、量杯半径为14.460 mm,剪切速率范围为1~450 s⁻¹,剪切速率呈指数变化,采用旋转流变仪自带的加热装置保持和控制污泥样品的温度,温度误差在±0.1℃。在每次测量之前先以最高剪切速率即450 s⁻¹预剪切5 min,然后再静置1 min,目的是消除污泥本身的记忆性^[14]。采用Herschel-Bulkley模型[式(1)]和Bingham模型[式(2)]分别拟合数据,得到屈服应力、流动性指数和稠度指数。

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

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,指流体开始流动时施加在流体上的应力,Pa; k 为稠度指数,Pa·s ^{n} ; γ 为剪切速率,s⁻¹; n 为流动性指数。当 n 和 τ_0 值分别为1和0时, k 值等于表观黏度。较低的 τ_0 和 k 以及较高的 n 值表征流体有较好的流动性。

$$\tau = \tau_0 + Ax \quad (2)$$

式中: A 为宾汉塑性黏度,Pa·s; x 为剪切速率,s⁻¹;其他参数同上。

1.3 污泥流变性的影响因素分析

在不同温度条件下考察颗粒物分布、溶解态有机物对污泥流变性的影响。本研究共设计了12、20、37、55和80℃五个温度梯度,分别模拟冬季、常温、中温、高温和蛋白质变性点温度。

厌氧处理污泥的TS、VS含量分别采用105℃烘干法和600℃灼烧法测定;粒径分布采用激光粒度分析仪测定。采用高效液相色谱-凝胶色谱(HPLC-GPC)分析不同温度下污泥上清液和污泥中溶解态有机物的分子质量分布;采用三维荧光光谱仪分析污泥上清液的有机物组分;采用总有机碳分析仪测定TOC含量;厌氧处理污泥过0.45 μm水系聚醚砜滤膜后,分别采用修正Lowry法和Dubious分光光度法测定溶解性蛋白质和多糖含量。

1.4 统计分析

采用Canoco 5软件,对颗粒态和溶解态有机物、温度、粒径等影响污泥流变性的因素进行冗余分析,明确影响污泥流变性的主要因素及其贡献。

2 结果与讨论

2.1 温度对污泥流变性的影响

当污泥浓度一定时,不同温度对污泥流变性的

影响如图2所示。可以看出,随着温度的上升和剪切速率的增大,污泥黏度逐渐降低,原因是温度升高导致分子间的运动速率加快,且随着剪切速率的增大,污泥中的颗粒物沿着剪切速率的方向被剪切和拉伸,两种因素使得污泥黏度逐渐降低。但当TS为2%、剪切速率 $<3\text{ s}^{-1}$ 时,污泥在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的黏度大于 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的黏度,这与污泥浓度一定时温度越高黏度越低的趋势不相符,分析原因可能是, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时温度过高导致污泥中的蛋白质变性,蛋白质结构发生变化,使得流动性变差,由此造成 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时污泥黏度大于 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的;随着剪切速率的增大,当剪切速率 $>3\text{ s}^{-1}$ 时, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的污泥黏度低于 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的污泥黏度。在剪切速率增大的过程中,由于剪切力的作用,污泥中颗粒物之间的缔合发生解散,较小的颗粒沿作用力方向形成队列而使得污泥黏度减小。

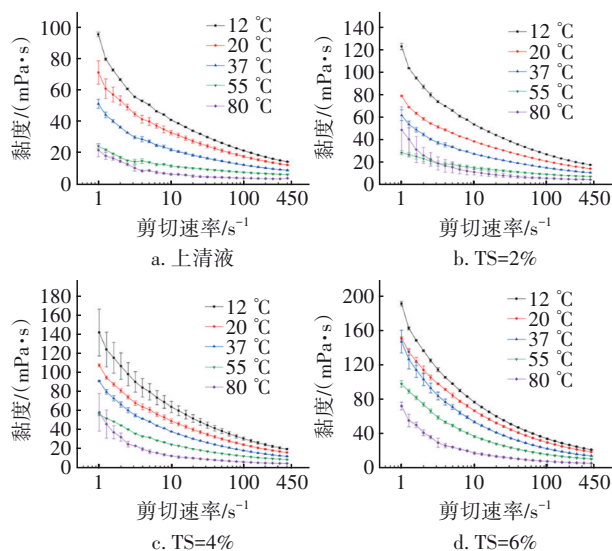


图2 污泥浓度一定时温度对污泥黏度的影响

Fig.2 Influence of temperature on sludge viscosity at a certain sludge concentration

2.2 污泥浓度对污泥流变性的影响

在温度一定时,随着污泥浓度的提高污泥黏度也在增大(见图3)。在常温至中温区间,上清液的黏度与TS=2%的污泥黏度大小和变化趋势非常接近,表明在TS含量较小($<2\%$)的条件下,污泥中可溶性有机物对污泥的流变性贡献率较大。在图3(b)~(d)中,TS $\geq 4\%$ 的污泥流变曲线与TS $\leq 2\%$ 的污泥流变曲线相比出现较大跃升,并且温度越高曲线之间的差距越大,随着剪切速率的提高曲线差距逐渐减小,表明在TS $\geq 4\%$ 时可溶性有机物对流变性的贡献率减小,颗粒物和污泥絮体对流变的影响占主

要因素。随着温度进一步升高,可溶性有机物对流变的影响越来越小,推测可能与有机物的分子质量和蛋白质水解变性有关^[15]。

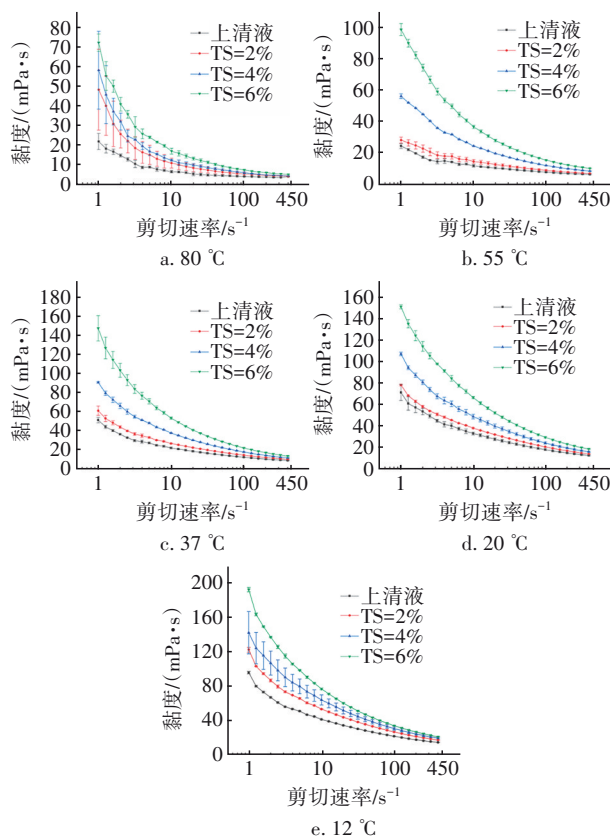


图3 温度一定时污泥浓度对黏度的影响

Fig.3 Influence of sludge concentration on viscosity at a certain temperature

对于不同TS含量的污泥,剪切速率提高时黏度的降低幅度不一致,在相同的剪切速率变化下,TS含量越高则动力黏度的变化量也越大。TS含量越低,随着剪切速率的增大则动力黏度越容易趋向稳定。这可能是因为TS含量越低,颗粒之间的相互作用越不明显,而高TS含量的污泥黏度趋于稳定所需的剪切速率更大。随着餐厨垃圾厌氧处理过程的进行,其混合液的含固率会逐渐降低。当含固率降到4%以下时,中温厌氧处理和高温厌氧处理的混合液流动特性已经较为接近。

2.3 模型拟合分析

以温度为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、TS含量为2%的污泥为例,采用Bingham模型和Herschel-Bulkley模型拟合分析污泥浓度和温度对污泥黏度的影响,拟合曲线如图4所示。Herschel-Bulkley模型的拟合程度高于Bingham模型,这表明Herschel-Bulkley模型更适合

描述本研究的餐厨垃圾厌氧处理污泥流变性特征,具体参数见表1。

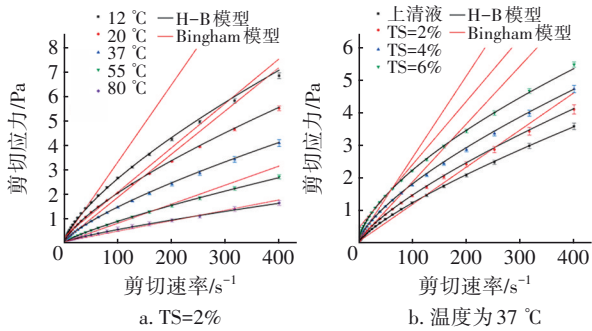


图4 污泥黏度的两种模型拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of two models for sludge viscosity

表1 餐厨垃圾厌氧消化污泥 Herschel-Bulkley 模型系数

Tab.1 Herschel-Bulkley model coefficients of food waste anaerobic digestion sludge

污泥浓度/%	温度/℃	τ_0/Pa	$k/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n	R^2	均方根误差
2	12	0.013 7±0.002 0	0.097 6±0.001 9	0.714 3±0.003 5	0.99	0.067
2	20	0.008 4±0.000 9	0.074 1±0.002 4	0.720 3±0.006 1	0.99	0.019
2	37	0.007 2±0.001 3	0.047 5±0.000 5	0.744 0±0.002 9	0.99	0.021
2	55	0.006 2±0.000 5	0.022 0±0.000 3	0.800 4±0.002 9	0.99	0.009
2	80	0.031 6±0.001 9	0.012 1±0.000 6	0.814 3±0.008 5	0.99	0.011
0	37	0.011 7±0.001 2	0.035 6±0.000 7	0.767 7±0.004 3	0.99	0.806
2	37	0.007 2±0.001 3	0.047 5±0.000 5	0.744 0±0.002 9	0.99	0.291
4	37	0.014 0±0.001 8	0.074 6±0.001 1	0.691 0±0.004 0	0.99	0.254
6	37	0.024 0±0.003 6	0.119 4±0.001 3	0.633 1±0.002 2	0.99	0.810

在污泥浓度一定的条件下, k 值随温度的升高逐渐减小,说明温度升高则污泥流变性增强;而 n 值随温度的升高逐渐增加,表明升温导致污泥的非牛顿特征逐渐减弱,污泥黏度趋于稳定,这可能是由于温度上升加快了污泥分子间的运动速率,增大了分子间距,减小了内摩擦力,进而导致污泥黏度降低^[16]。

2.4 污泥流变性成因分析

2.4.1 颗粒物粒径对流变性的影响

图4显示,剪切应力随着剪切速率的提高而增大,并且随着温度的升高,剪切应力曲线趋于平滑,说明在剪切速率相同时温度越高则污泥黏度越小,与前文得出的结果一致。TS 含量越高,污泥的剪切应力越大^[17]。温度相同时,污泥的剪切应力随含固率的提高而成比例变化,通过图5所示的污泥粒径分布曲线可以看出,3种浓度的污泥粒径分布具有较好的一致性,由此推测剪切应力变化的原因可能是,污泥中的颗粒物含量虽有所不同,但其中的颗粒物粒径分布比例相似。

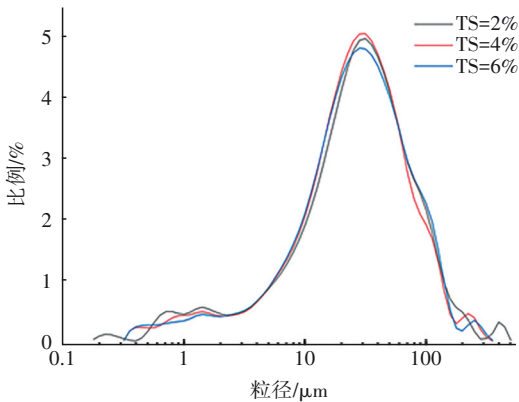


图5 不同污泥浓度下的粒径分布

Fig.5 Particle size distribution of sludge with different concentrations

污泥本身的复杂性质使得其流变性同时受多种因素影响,不仅受颗粒物粒径的影响,同时也受其他因素的影响。污泥絮体受到温度升高或剪切力等外在因素的影响会发生解体,使得其粒径减小,同时释放大量可溶性有机物(多糖、蛋白质等)。Wang 等人^[18]以玉米加工废水的颗粒污泥为研究对象,采用流变学方法表征厌氧颗粒污泥,发现颗粒污泥随着颗粒尺寸的减小呈现流化趋势,较大粒径的颗粒污泥因为结构更稳定,其屈服应力高于较小粒径的颗粒污泥;Li 等人^[7]的研究结论却与之相反,他们以再生水厂的厌氧处理污泥为进料,分析了反应器在稳定运行条件下的污泥粒径和流变参数,结果表明,在给定的TS 含量下,粒径越小,屈服应力上升越明显。因为当TS 含量一定时,粒径的减小意味着污泥颗粒之间的接触面和颗粒数量的增加,从而导致更频繁的相互作用。污泥絮体解体导致污泥粒径减小,理论上会使黏度增加,但絮体破裂会释

放出大量可溶性有机物,这有助于污泥流动。所以从机理上,多数颗粒态对污泥流变性的影响可通过污泥粒径分布机理对流变的影响来解释。污泥表现出的流变性是多因素共同作用的结果。

2.4.2 溶解态有机物对流变性的影响

如图2(b)所示,在低剪切速率($<3\text{ s}^{-1}$)时,80℃的污泥黏度大于55℃的污泥黏度,这可能与蛋白质变性有关。Jin等人^[19]研究发现,经过高温厌氧处理,污泥中的主要生物聚合物为变性和去折叠的蛋白质分子,并且变性蛋白质通过改变结合水的含量而影响污泥黏度^[20]。为了验证这一假设,本研究考察了不同温度下(37、55和80℃)TS含量为2%的污泥的分子质量分布特征,如图6所示。

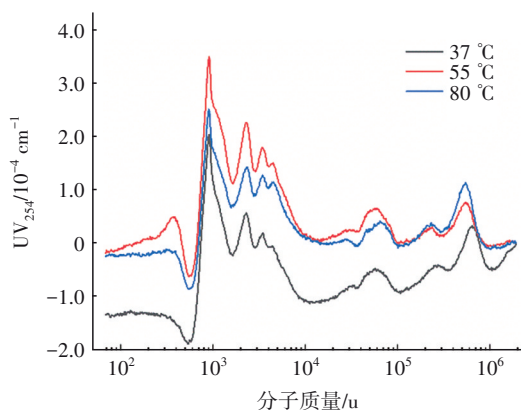


图6 TS为2%时不同温度下污泥上清液的分子质量分布
Fig.6 Molecular weight distribution of sludge supernatant at different temperatures and TS content of 2%

由图6可知,80℃时分子质量 $>10^5\text{ u}$ 的有机物含量增多,进而降低了污泥流变性,所以在低剪切速率下80℃时的上清液黏度大于55℃时的上清液黏度;但随着剪切变稀作用 and 高温下EPS破碎释放

出溶解态有机物,使得在剪切速率 $>3\text{ s}^{-1}$ 时80℃的上清液黏度低于55℃的上清液黏度。而在 $\text{TS}\geq 4\%$ 时又恢复了温度和黏度的负相关性,原因是TS含量的增大使得污泥中颗粒物含量增加,颗粒物对流变性的影响占主要地位。另外,与常温和中温相比,高温厌氧处理显著改善了餐厨垃圾的流动性,但高温下蛋白质可能发生变性或结构变化,Forster等人^[21]曾提出减少束缚水可以降低污泥黏度和屈服应力,随着热处理时间的延长,更多的有机物和自由水溶解到液相,从而对污泥黏度产生影响。

从图2(a)可以看出,在12、20和37℃下,当施加的剪切速率为 1 s^{-1} 时,污泥上清液黏度的减小量均呈等差变化,随温度的上升黏度减少量在20 mPa·s左右,但温度升高至55℃以后,黏度较37℃时有较大降幅,达到了30 mPa·s左右,这可能与有机物含量的变化有关,为了验证该猜想,测定了37、55和80℃下上清液的三维荧光光谱和TOC浓度,结果如表2和图7所示。三维荧光光谱可划分为5个区域(I~V),分别代表芳香类蛋白质I、芳香类蛋白质II、富里酸类物质、溶解性微生物代谢产物类物质(SMP)、腐殖酸类物质^[22-23]。

表2 不同温度下污泥上清液TOC浓度和三维荧光强度

Tab.2 TOC concentration and three-dimensional fluorescence intensity of sludge supernatant at different temperatures

温度/ ℃	TOC/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	三维荧光强度				
		I	II	III	IV	V
37	4 853	2 937	3 939	1 595	2 623	1 083
55	5 460	3 303	1 828	609	2 371	379
80	5 520	4 060	2 411	1 140	2 861	643

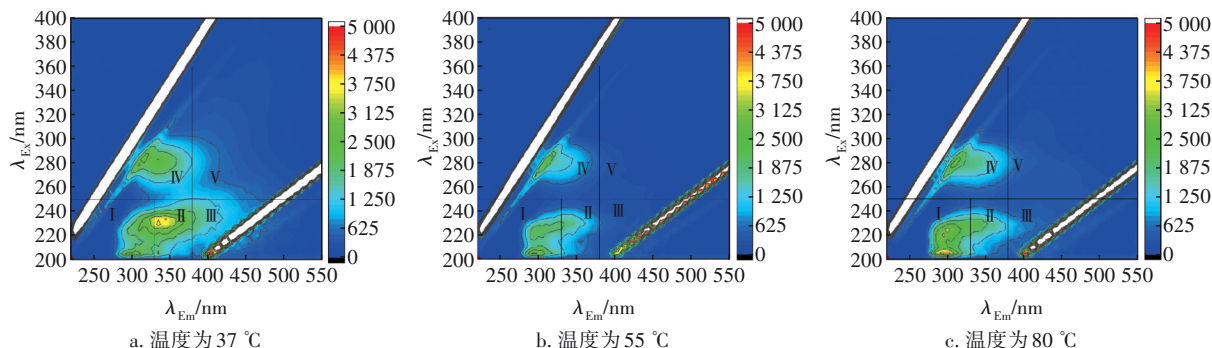


图7 不同温度下污泥上清液的三维荧光光谱

Fig.7 Three-dimensional fluorescence spectrum of sludge supernatant at different temperatures

如表2和图7所示,随着温度的升高,污泥上清液中的有机物发生了变化,溶解性有机物增多。例

如,芳香类蛋白质I的荧光强度从2 937增加到4 060,而腐殖酸类物质的荧光强度降至很低,表明

上清液中的腐殖酸类物质在升温过程中降解成小分子的芳香类蛋白质 I, 原因可能是温度升高后 EPS 解体, 可溶性 EPS (SB-EPS) 含量增加, 使得污泥结构更加疏松, 更多的自由水可以释放出来, 导致污泥流变性增强^[24]。Zhang 等^[23]分析了酸化和厌氧中温消化污泥的 EPS 组分变化, 发现经过处理后污泥的有机物种类和含量发生了变化, 其中紧密结合型 EPS (TB-EPS) 和疏松型 EPS (LB-EPS) 向 SB-EPS 转移, 尤其是 SMP 含量增加, 使得污泥结构更疏松, 流变性增强。55 和 80 °C 时污泥上清液的 TOC 浓度相差较少, 三维荧光光谱图中的峰分布也较类似, 可能是因为这两种温度下污泥上清液的黏度接近。

2.5 污泥流变性成因分析

基于 Herschel-Bulkley 模型拟合分析结果, 考察污泥的屈服应力 τ_0 、稠度指数 k 和流动性指数 n 与温度及污泥浓度的关系, 结果如图 8 所示。

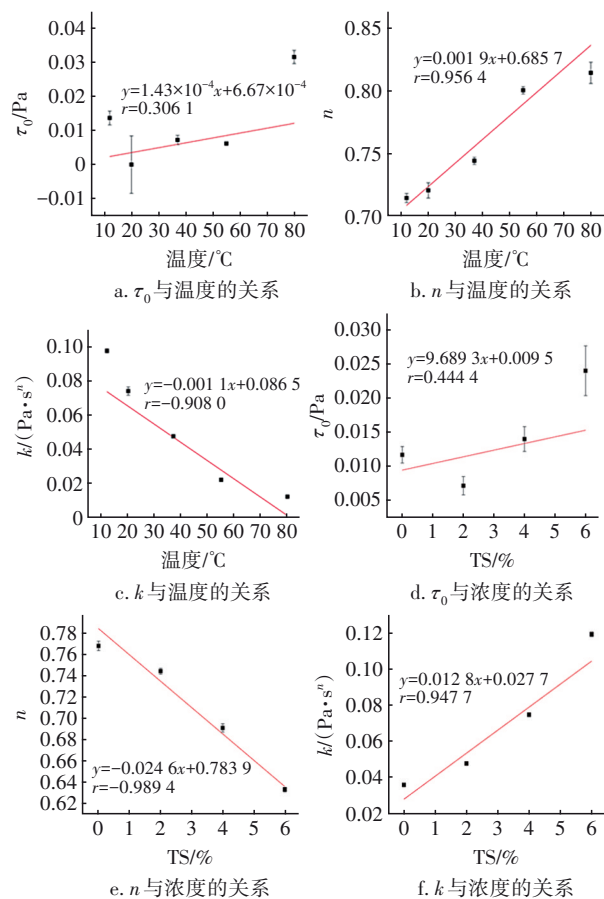


图8 τ_0 、 n 和 k 与温度及污泥浓度的线性关系

Fig.8 Linear relationship between τ_0 , n , k and temperature, sludge concentration

由图 8(a)~(c)可知, 在一定污泥浓度 (TS=2%) 下, 稠度指数 k 与温度显著负相关 ($r=-0.9080$), 流

动性指数 n 与温度显著正相关 ($r=0.9564$), 这均说明温度升高则污泥流变性增强; 而屈服应力 τ_0 与温度没有显著相关性, 屈服应力没有随着温度的升高而逐渐降低。因为屈服应力很难被评估, 目前关于屈服应力是否存在仍有很大的争议^[25]。目前在确定材料屈服应力的流变模型和实验方法方面存在差异, 例如, Miryahyaei 等^[26]认为屈服应力的测量可能受到壁面滑移和端部效应的影响, 导致测得的应力值存在误差。但流动性指数 n 的增大和稠度指数 k 的减小可以说明厌氧处理破坏了污泥的网络结构, 尤其污泥表观黏度在高温厌氧处理后降低, 这可能与污泥絮体破裂有关, 絮体破裂导致更多的 EPS 释放, 进而增强了污泥流变性^[23]。如图 8(d)~(e)所示, 在温度为 37 °C 条件下, 稠度指数 k 与污泥浓度显著正相关 ($r=0.9477$), 流动性指数 n 与污泥浓度显著负相关 ($r=-0.9894$), 这说明污泥浓度增加则污泥流变性减弱; 但屈服应力 τ_0 与污泥浓度没有显著相关性, 原因同上。

为了更直观地反映温度、含固率、溶解态有机物以及粒径分布对流变性的影响, 将以上因素进行了冗余分析, 结果如图 9 所示 (图中“TS6T80”表示 TS=6%、温度=80 °C, 其他以此类推)。

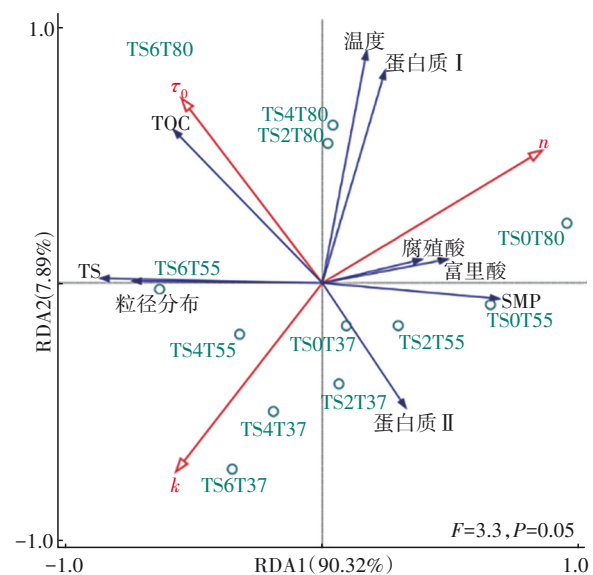


图9 污泥流变性影响因素的冗余分析

Fig.9 Redundancy analysis of influencing factors of sludge rheology

从图 9 可以看出, 温度以及溶解态有机物中的芳香类蛋白质 I、腐殖酸、富里酸和 SMP 等因素与污泥的流动性指数 n 呈正相关, 这说明温度和溶解

态有机物是影响污泥流变性的重要因素;并且温度与芳香类蛋白质 I、腐殖酸、富里酸等溶解态有机物之间的夹角余弦值为正,说明温度升高则溶解态有机物增多^[27],污泥流变性增强。TS和粒径分布与稠度指数 k 呈正相关,这是因为随着含固率的增加,污泥颗粒间的相互作用增强,导致了污泥黏度的增加。因为存在误差的影响,使得 τ_0 的数据并不理想,故对 τ_0 的影响因素不进行过多分析。

3 结论

① 对于餐厨垃圾厌氧处理污泥,随着TS含量的增大,污泥中的颗粒数量增多,颗粒之间形成污泥絮体的趋势增强,使得流体的流动受到更大的阻力,表现为流体动力黏度增加。

② 溶解性有机物和颗粒物均对污泥的流变性有重要影响,当TS \leq 2%时,污泥的流变性受溶解态有机物影响较大;当TS \geq 4%时,流变性主要受颗粒物的影响。但随着温度的升高,颗粒物会分解成小分子有机物,导致流变性增强。

参考文献:

- [1] 王凯军,王婧瑶,左剑恶,等.我国餐厨垃圾厌氧处理技术现状分析及建议[J].环境工程学报,2020,14(7):1735-1742.
WANG Kaijun, WANG Jingyao, ZUO Jian'e, et al. Analysis and suggestion of current food waste anaerobic digestion technology in China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(7): 1735-1742 (in Chinese).
- [2] 宫亚斌,陈智远,姚建刚,等.200 t/d餐厨垃圾厌氧产沼工程调试与运行分析[J].可再生能源,2017,35(10):1443-1447.
GONG Yabin, CHEN Zhiyuan, YAO Jiangang, et al. Analysis of 200 t/d food waste anaerobic biogas production project [J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(10): 1443-1447 (in Chinese).
- [3] LIU J B, YU D W, ZHANG J, et al. Rheological properties of sewage sludge during enhanced anaerobic digestion with microwave-H₂O₂ pretreatment [J]. Water Research, 2016, 98: 98-108.
- [4] HONG E, YENENEH A M, SEN T K, et al. The relationship between physico-chemical and rheological characteristics of digested sludge, biosolid, centrate and the effects on dewatering performance (a case study) [J]. Journal of Water Process Engineering, 2017, 19: 193-204.
- [5] ESHTIAGHI N, YAP S D, MARKIS F, et al. Clear model fluids to emulate the rheological properties of thickened digested sludge [J]. Water Research, 2012, 46(9): 3014-3022.
- [6] BAUDEZ J C, GUPTA R K, ESHTIAGHI N, et al. The viscoelastic behaviour of raw and anaerobic digested sludge: strong similarities with soft-glassy materials [J]. Water Research, 2013, 47(1): 173-180.
- [7] LI Y Q, SONG Z Y, YUAN Y, et al. Rheology improvement in an osmotic membrane bioreactor for waste sludge anaerobic digestion and the implication on agitation energy consumption [J]. Bioresource Technology, 2020, 295: 122313.
- [8] LIU J B, YANG M, ZHANG J Y, et al. A comprehensive insight into the effects of microwave-H₂O₂ pretreatment on concentrated sewage sludge anaerobic digestion based on semi-continuous operation [J]. Bioresource Technology, 2018, 256: 118-127.
- [9] DAI X H, GAI X, DONG B. Rheology evolution of sludge through high-solid anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2014, 174: 6-10.
- [10] 王彦祥.餐厨垃圾厌氧消化污泥的流变性质研究[D].重庆:重庆大学,2014.
WANG Yanxiang. Study on Rheological Properties of Anaerobic Digestion Sludge of Food Wastes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese).
- [11] MONTEIRO P S. The influence of the anaerobic digestion process on the sewage sludges rheological behaviour [J]. Water Science & Technology, 1997, 36(11): 61-67.
- [12] PANIGRAHI S, DUBEY B K. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste [J]. Renewable Energy, 2019, 143: 779-797.
- [13] MORI M, SEYSSIECQ I, ROCHE N. Rheological measurements of sewage sludge for various solids concentrations and geometry [J]. Process Biochemistry, 2006, 41(7): 1656-1662.
- [14] BAROUTIAN S, ESHTIAGHI N, GAPES D J. Rheology of a primary and secondary sewage sludge mixture: dependency on temperature and solid concentration [J]. Bioresource Technology, 2013, 140: 227-233.
- [15] FARNO E, BAUDEZ J C, PARTHASARATHY R,

- et al.* Impact of thermal treatment on the rheological properties and composition of waste activated sludge: COD solubilisation as a footprint of rheological changes [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 295: 39–48.
- [16] 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).
- [17] LI T, WANG Y L, DONG Y J. Effect of solid contents on the controlled shear stress rheological properties of different types of sludge [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(11): 1917–1922.
- [18] WANG H F, HU H, YANG H Y, *et al.* Characterization of anaerobic granular sludge using a rheological approach [J]. Water Research, 2016, 106: 116–125.
- [19] JIN B, WILÉN B M, LANT P. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 95(1/3): 221–234.
- [20] FARNO E, BAUDEZ J C, PARTHASARATHY R, *et al.* Rheological characterisation of thermally-treated anaerobic digested sludge: impact of temperature and thermal history [J]. Water Research, 2014, 56: 156–161.
- [21] FORSTER C F. The rheological and physico-chemical characteristics of sewage sludges [J]. Enzyme & Microbial Technology, 2002, 30(3): 340–345.
- [22] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, *et al.* Fluorescence excitation–emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24): 5701–5710.
- [23] ZHANG S W, LIANG J L, HUANG J J, *et al.* Analysis of the relationship of extracellular polymeric substances to the dewaterability and rheological properties of sludge treated by acidification and anaerobic mesophilic digestion [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 369: 31–39.
- [24] LIU G J, LIU Y, WANG Z Y, *et al.* The effects of temperature, organic matter and time-dependency on rheological properties of dry anaerobic digested swine manure [J]. Waste Management, 2015, 38: 449–454.
- [25] BONN D, DENN M M. Yield stress fluids slowly yield to analysis [J]. Science, 2009, 324(5933): 1401–1402.
- [26] MIRYAHYAEI S, OLINGA K, ABDUL MUTHALIB F A, *et al.* Impact of rheological properties of substrate on anaerobic digestion and digestate dewaterability: new insights through rheological and physico-chemical interaction [J]. Water Research, 2019, 150: 56–67.
- [27] FARNO E, BAUDEZ J C, PARTHASARATHY R, *et al.* Impact of temperature and duration of thermal treatment on different concentrations of anaerobic digested sludge: kinetic similarity of organic matter solubilisation and sludge rheology [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 273: 534–542.

作者简介:梁玉帅(1995–),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为膜污染控制技术。

E-mail:lys15122117710@163.com

收稿日期:2020-06-10

修回日期:2020-08-26

(编辑:刘贵春)