

黄原胶溶液模拟消化污泥流动性能分析

曹秀芹, 袁海光, 赵振东, 丁浩

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 为污泥消化反应器流场的可视化研究提供可行性方法, 该文根据同流体流动相似准则分别从密度和流变学特性来分析黄原胶透明溶液作为常规消化污泥相似溶液的可行性。采用质量法和流变仪分别测量不同浓度污泥和添加 KCl 的黄原胶溶液的密度及流变特性。结果表明 15 g/L 添加 KCl 的黄原胶溶液与 95% 含水率污泥在密度不具有显著性差异的前提下具有相似的流变特性, 流变曲线的决定系数分别为 $R^2=0.9953$ (动力黏度)、 $R^2=0.8935$ (剪切应力), 均为典型的假塑性非牛顿流体。混合试验表明 2 种流体中示踪剂浓度的变化规律相似且均在 40 min 后趋于平衡浓度 50 mg/L。等同性分析表明, 在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时, 2 种流体中以流变特性和密度为参数的双侧 t 检验不具有显著性差异, 符合同流体流动相似准则。故添加 KCl 的黄原胶溶液可以作为污泥的透明相似溶液, 为污泥等不透明生物质流体厌氧消化的模拟及可视化研究奠定基础。

关键词: 污泥; 流体; 消化; 黄原胶溶液; 相似溶液; 示踪试验; 等同性分析

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.15.033

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-15-0260-06

曹秀芹, 袁海光, 赵振东, 丁浩. 黄原胶溶液模拟消化污泥流动性能分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 260-265. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.15.033 http://www.tcsae.org

Cao Xiuqin, Yuan Haiguang, Zhao Zhendong, Ding Hao. Analysis on xanthan gum solution to simulate flow performance of digestion sludge[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 260-265. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.15.033 http://www.tcsae.org

0 引言

厌氧消化技术因其具有运行费用低, 能源效益高等优点而成为目前国内外广泛应用的一种污泥稳定化技术^[1-3]。但国内外已建成的污泥厌氧消化项目在运行中经常会出现分层、浮渣、结壳等现象, 且随着高含固厌氧消化技术的出现, 搅拌效果差、传质传热困难、能耗高等问题以及反应器在运行过程中的流场分布对厌氧消化过程的影响日益受到关注^[4-7]。研究表明厌氧消化工程中混合过程的能耗占整座污水处理厂能耗的 14%~54%^[8-9]。因此, 混合过程中流场优化和控制日益成为厌氧消化反应器设计及运行中的重要环节。

污泥作为一种不透明非牛顿流体, 通常情况下无法精确及全面地获得其在厌氧反应器中的相关流动特性^[10]。随着计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的快速发展, CFD 模拟仿真技术开始运用到反应器的流场分析及优化设计中, 有效地完成了对污泥等不透明流体流场的可视化分析, 极大提高了反应器流场研究的效率。Karpinska 等^[11]指出 CFD 技术相比于传统的半经验方法该技术在提高处理效率, 降低能耗方面具有可行性。Wu 等^[12]基于流变学等其他物料特性利用 CFD 技术模拟了非

牛顿生物质流体在产甲烷反应器中的相关性能, 提出利用耦合的物理-生化模型研究生物质能源回收是 CFD 技术应用于生物反应器模拟的主要目标, 但是模拟结果的准确性还需进一步探讨, 仍需将模拟结果与试验结果进行比较验证^[13]。一些研究人员采用间接验证的方法来证明 CFD 模拟结果的准确性, Terashima 等^[14]采用氯化锂作为示踪剂来判断消化污泥是否搅拌均匀, 但由于污泥的不透明性, 不能测量反应器内流场变化情况。Bi 等^[15]利用加温条件下, 温度场与流场分布的关联性, 通过温度场的测试间接验证流场模拟的可靠性, 但这种方法操作性差且不太适用于生物反应器。因此, 研究人员开始借助粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 和激光多普勒测速技术 (laser doppler velocimetry, LDV) 等现代化的直接测量手段对 CFD 模拟结果进行验证校核, 结果显示试验结果与模拟结果吻合较好^[16-17]。然而基于光学或声学原理的 PIV 或 LDV 只能应用于透明均质流体的流场分布研究中。因此为了准确研究污泥等不透明生物质流体厌氧反应器中的流场信息, 需要寻找一种在 CFD 模拟过程中同污泥的物料特性 (黏度、密度) 较为相似的透明溶液来进行流场试验, 直观验证 CFD 模拟结果的准确性和可靠性。近年来开始有大部分学者利用黄原胶溶液的流变性能来研究血液的流动、血栓等传质问题^[18-19]。Brookshier 等^[20]发现黄原胶/甘油透明混合溶液 (黄原胶 0.04%、甘油 40%、NaCl 0.5%) 能较准确模拟红细胞含量为 46% 的猪血液的血管动力学特性。Amanullah 等^[21]使用黄原胶溶液作为模型系统研究多糖发酵反应器中因内在流变特性引起的流体混合等传质问

收稿日期: 2017-03-27 修订日期: 2017-07-25

基金项目: 北京市教委 (北京市自然科学基金) 科技重点项目 (KZ201310016017)

作者简介: 曹秀芹, 女, 教授, 主要从事污泥及固体废弃物资源化利用、CFD 数值模拟等方面研究。北京 北京建筑大学环境与能源学院, 100044。Email: caoxiuqin@bucea.edu.cn

题,观察了搅拌强度对细菌形态和发酵产物的影响。Low 等^[22]选用黄原胶溶液(0.15%)作为消化污泥(2.23%)的模拟流体,通过荧光染料的酸碱中和反应研究了厌氧搅拌反应器中流场的变化情况。Cao 等^[23]利用 Carreau 模型验证了剪切速率在(2.7~300.1) s⁻¹范围内黄原胶溶液作为 1.32%含固率污泥相似溶液的可行性。Sajjadi 等^[24]采用 Power law 模型模拟了黄原胶溶液(0.3%)流变特性随消化过程的变化规律,验证了 CFD 模拟消化污泥(2.25%)射流搅拌结果的准确性。

这些通过原型与模型流变特性相似的研究方法为污泥等不透明流体的可视化研究提供了可能性,然而为了确定其合理性与科学性,其分析过程需要从流体的主要物理性质角度进行流动相似的理论验证。本试验先从流体主要物理性质角度进行流动相似的理论分析,同时基于中国目前大部分污泥厌氧消化工程中污泥含固率在 3.2%~6%之间的实际情况^[25-27],选择 95%含水率污泥作为试验对象并进行混合示踪试验的流动分析,比较 2 种流体中示踪粒子浓度随时间变化规律的相似性,最后通过数理分析来确定某一浓度的黄原胶溶液作为污泥相似溶液的可行性。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与仪器

1.1.1 试验材料

本试验污泥样品取自北京某污水处理厂浓缩脱水后的泥饼,含水率为 76.4%。通过向样品中添加自来水将泥饼配成含水率为 95%的污泥;本试验所用的黄原胶(Xanthan Gum-Keltrol T, XGKT)为食品级,微粒尺寸为 80 目,密度为 836 kg/m³。室温条件下,分别将经准确称量的黄原胶粉末分批搅拌溶解于去离子水中,置于转速为 500 r/min 的电磁搅拌器中搅拌 30 min,待混合均匀后移入 500 mL 容量瓶中定容,得到一定浓度梯度的 XGKT 透明溶液。KCl 粉末(分析纯)用于调整相似溶液的物理特性,LiCl 粉末(分析纯)用作流动混合试验中的示踪剂。

1.1.2 试验仪器

101-3AB 型电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司);SX2-12-10 型箱式电阻炉(天津市中环实验电炉有限公司);Haake Viscotester 550 型旋转黏度计(德国 Haake 公司);DCY-0506 型低温恒温槽(上海舜宇恒平科学仪器有限公司);Sartrious BS223 S 型电子分析天平(德国 Sartrious 公司);PinAAcle900T 原子吸收分光光度计(美国 PerkinElmer 科技公司)。

1.2 试验方法与装置

1.2.1 试验方法

污泥的含水率、密度等基本指标依据 APHA 标准进行测定。95%含水率污泥及由黄原胶粉末配制成不同浓度的 XGKT 溶液(XGKT solution)的流变特性采用 Haake Viscotester 550 型旋转流变仪进行测量,采用 DCY-0506 型恒温槽将测量温度控制在(25±0.1)℃范围内,剪切速率从(0~180) s⁻¹递增,通过计算机软件平台收集并记

录测量数据,得到该剪切速率范围内样品流变参数的变化情况。分别对添加示踪剂的含水率 95%的污泥和 15 g/L KCl-XGKT 溶液进行转速为 180 r/min 的连续搅拌混合示踪试验,每隔 5 min 取次样,比较取样口处 2 种流体中 LiCl 浓度随时间变化规律的相似性。锂的测定方法为常压消解后火焰原子吸收光谱法,参照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)中的土壤样品预处理法和《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T221-2005)中钾元素测定的常压消解后火焰原子吸收光谱法。

1.2.2 试验装置

试验装置的设计参考《搅拌与混合设备设计选用手册》,反应器具体尺寸为:高 60 cm,内径 38 cm,叶轮共设 2 组,叶轮直径为 12 cm,叶轮间距为 17 cm,有效容积 50 L。

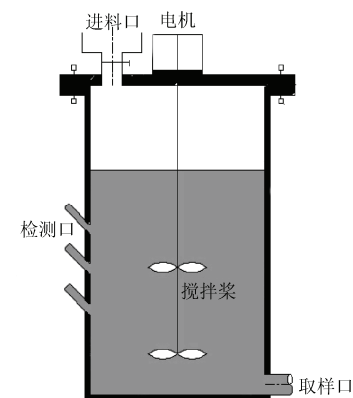


图 1 混合试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of mixing experimental apparatus

1.2.3 试验设计

1) 污泥及相似溶液密度相似性分析试验:通过配制 13、16、19 g/L XGKT 透明溶液(XGKT solution)与 95%含水率污泥进行相似分析。

2) 污泥及相似溶液流变性能试验:吴伟都等^[28-29]研究表明二价阳离子对黄原胶溶液流变特性的影响明显大于一价阳离子,且较高盐浓度时 Na⁺影响大于 K⁺。故为调整 2 种流体的密度差,用 KCl 溶液代替水溶液作为溶剂,配制 14、15、16 g/L 的 XGKT 透明溶液,密度分别为 1033.4、1033.2、1033.6 kg/m³。添加 KCl 后 XGKT 溶液的密度与 95%含水率污泥的密度接近。2 种流体就密度项物理参数而言,不具有显著差异,但需要在此密度试验的基础上再次验证 2 种流体的流变特性以期符合同流体运动相似准则。在恒温(25±0.1)℃条件下,测定质量浓度为 14、15、16 g/L 添 KCl 的 XGKT 透明溶液(KCl-XGKT solution)及含水率为 95%污泥的流变特性。

3) 污泥及相似溶液混合性能试验:搅拌强度是影响搅拌效果最重要的参数,不同物料的最优搅拌强度可能有所差异。Buswell 等^[30]认为厌氧消化装置的每次搅拌时间不应超过 1 h。赵东方^[31]通过示踪试验发现含固率 10%左右的污泥厌氧消化中良好的机械搅拌强度在(200±40) r/min 范围内。本次流动混合试验中,去除污泥背景值后示踪剂 LiCl 的平衡浓度为 50 mg/L。

1.3 分析方法

1.3.1 同流体运动相似性分析

为了保证模型与原型有相同的流动规律,将模型试验的结果应用于原型,模型与原型应满足流动相似,同流体运动有关的物理量可以分为3类:①表征流场几何形状的物理量;②表征流场运动状态的物理量;③表征流场动力的物理量,如密度、动力黏度、压力、惯性力等。因此流动相似就要求模型与原型几何相似、运动相似和动力相似。依据相似原理与模型试验基础理论中的雷诺准则和佛汝德准则,为了使模型与原型流动尽可能相似,在满足几何相似的前提下,雷诺准则和佛汝德准则应同时得到满足,即2种流体的雷诺数和佛汝德数分别相等。当模型与原型为不同种流体且长度比尺为1时,求得2种流体黏度比尺为1,速度比尺为1,即当2种流体黏度与密度的比值相等时,2种流体的速度等表征流场运动状态的物理量相等。田正宏等^[32]认为流变相似要求模拟介质与原型材料的流变曲线一致,流变参数接近。本试验中首先采用最小二乘法对流变曲线进行拟合度检验,分析黄原胶溶液与消化污泥的流变曲线相似程度,然后研究2种流体密度的相似程度。通过拟合度检验以后,再进行等同性检验,来验证二者的物理特性参数的统计学分布情况是否一致。

1.3.2 拟合度检验

首先假设XGKT透明溶液可做污泥的相似溶液,对不同浓度的XGKT透明溶液与消化污泥的流变曲线进行拟合度检验。选取剩余平方和检验法,根据回归分析原理,曲线回归效果用决定系数 R^2 来衡量。 R^2 的计算公式为

$$R^2 = \frac{S_R}{S_T} = 1 - \frac{S_L}{S_T} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}]^2} \quad (1)$$

式中 S_R 表示回归平方和; S_T 表示总偏差平方和; S_L 表示残差平方和; y_i 表示模拟值; $f(x)$ 表示原型值。

2 结果与分析

2.1 污泥及相似溶液物理特性分析

2.1.1 污泥及相似溶液密度分析

由图2可知,2种流体的黏度随剪切速率的增加而减小,剪切应力随剪切速率的增加而增加,均表现出假塑性非牛顿流体特性,并且16 g/L XGKT溶液与95%含水率污泥的流变特性具有很好的相似性。说明该浓度XGKT溶液作为常规消化污泥的相似溶液从流变特性角度分析具有可行性。然而同时发现在满足流变相似后XGKT溶液的密度却小于目标溶液的密度,不满足同流体运动的相似准则。

2.1.2 污泥及相似溶液流变性能分析

如图3所示,发现,添加KCl后XGKT溶液的黏度与剪切应力均稍微增大,这可能是由于在黄原胶浓度较高时,加入大量的盐屏蔽了黄原胶三糖侧链上的静电排斥作用,所形成的螺旋骨状构象反过来促进了溶液中有序黄原胶分子的交联程度从而使溶液黏度增加^[33]。但仍

表现出假塑性非牛顿流体特性。添加KCl后,15 g/L XGKT溶液与95%含水率污泥的流变特性呈现出更好的相似性。

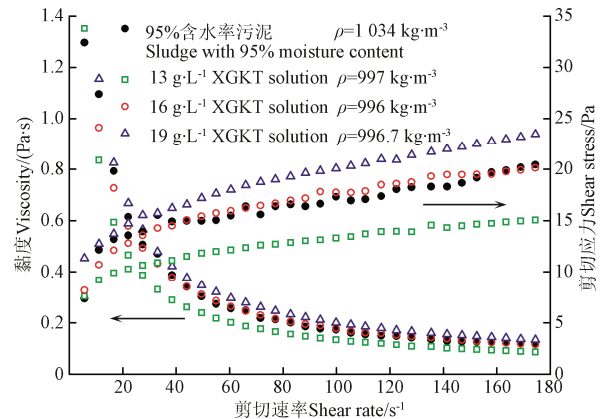


图2 黄原胶XGKT溶液与污泥的流变特性

Fig.2 Rheological characteristics of XGKT solution and sludge

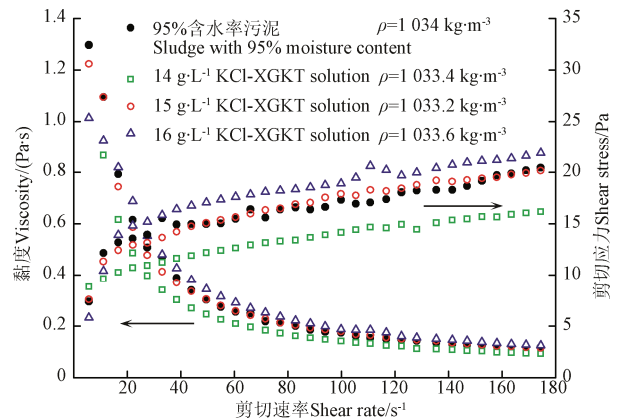


图3 添加KCl的XGKT溶液与污泥的流变特性

Fig.3 Rheological characteristics of XGKT solution with KCl and sludge

为更加直观表现KCl-XGKT溶液与95%含水率污泥流变性能的相似程度,将2种流体的流变曲线的决定系数列于表1。由表1可知不同浓度KCl-XGKT溶液中,15 g/L KCl-XGKT溶液与含水率95%污泥的流变性能最为相似,当剪切速率在(0~180) s⁻¹范围内变化时,2种流体黏度和剪切应力随剪切速率回归曲线的决定系数分别为 $R^2=0.9953$ (动力黏度)、 $R^2=0.8935$ (剪切应力),均表现出最高的相似性,说明在密度相似前提下,15 g/L KCl-XGKT溶液具有95%含水率污泥相似的流变性能,其具备作为污泥透明相似溶液的物理特性。然而,在实际流动过程中影响非牛顿流体运动的客观因素远不止理论分析中所涉及的物理特性,所以为验证该理论分析的有效性及应用性,需要进行相应流体混合的示踪试验。

表1 不同浓度KCl-XGKT溶液与污泥流变曲线的相关性

Table 1 Rheological curve correlation of sludge and KCl-XGKT solution with different concentration

KCl-XGKT solution/(g·L ⁻¹)	R^2	
	黏度曲线 Viscosity curve	应力曲线 Stress curve
14	0.926 2	0.154 9
15	0.995 3	0.893 5
16	0.951 9	0.567 2

2.1.3 污泥及相似溶液混合性能分析

图 4 为含水率为 95% 的污泥和 15 g/L KCl-XGKT 溶液中示踪剂浓度随混合时间的变化情况。当搅拌强度为 180 r/min 时, 取样口处 2 种流体中示踪粒子的浓度曲线虽然都出现震荡的现象, 但具有相似的变化趋势, 均随着混合过程而上升, 并在 40 min 后趋于平衡浓度 50 mg/L。其中, 2 种流体中示踪剂的浓度在前 10 min 内都急剧升高至 36 mg/L 左右, 这可能是由于携带大量示踪剂的流体被搅拌至取样口处所致。说明 15 g/L KCl-XGKT 溶液不仅具有 95% 含水率污泥相似的流变性能, 符合同流体运动所要求的相似准则, 而且还满足实际流动混合示踪试验。

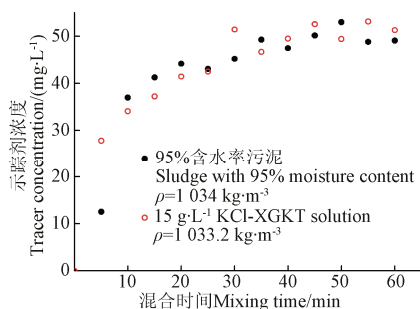


图 4 KCl-XGKT 溶液与污泥流体中示踪剂浓度随时间变化情况
Fig.4 Variation of tracer concentration with time in KCl-XGKT solution and sludge

2.2 两种流体参数等同性分析

通过上述分析可知利用 15 g/L KCl-XGKT 溶液作为 95% 含水率污泥的相似溶液研究污泥厌氧消化过程中反应器中的流动特性具有可行性。然而, 2 种流体的流动参数是否具有显著性差异还需要进行检验。假设所有试验物料的物理特性(黏度、密度)测量结果所组成的样本总体服从正态分布, X 、 Y 分别表示污泥和 KCl-XGKT 溶液的物理特性参数数据样本, $n_1=4$, $n_2=3$ 分别为 2 个样本数据个数。由于 X 、 Y 服从正态分布且总体方差未知, 且 $\min\{n_1, n_2\} < 30$, 可应用双侧 t 检验来对污泥和 KCl-XGKT 溶液物理特性参数的等同性进行验证, 在相同的试验条件下对比试验结果差异性, 来确定物理特性参数的平均值是否在一个可接受的范围内。2 个样本方差未知且不同情况下, T 统计计算公式为:

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t(n_1 + n_2 - 2) \quad (2)$$

式中 S_w 为 2 个样本数据的合并方差。

从式 (2) 可以看出, 如果待检验的 2 个样本均值差异较小, t 值较小, 则说明 2 个样本的均值不存在显著差异。由 15 g/L KCl-XGKT 溶液和 95% 含水率污泥拟合度检验结果可知, 2 种物料的物理特性参数相近、参数曲线相似, 测试数据满足小样本双侧 t 检验要求, 可通过物料等同性检验进一步分析判断。其中以极限黏度为流变基本参数的双侧 t 检验的统计量为 t_1 、以密度为基本参数的双侧 t 检验的统计量为 t_2 。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件

下, $t_1=-0.1113$ 、 $t_2=-0.1622$ 均在 ± 2.5706 范围内, 说明 2 种物料流变特性、密度的试验数据无显著性差异, 即浓度为 15 g/L KCl-XGKT 溶液与 95% 含水率污泥物理特性参数(黏度、密度)无显著性差异。从数理统计的角度证明了理论分析的有效性, 即 15 g/L KCl-XGKT 溶液作为 95% 含水率污泥的相似溶液具有可行性。

3 结论

1) 本文依据相似原理与模型试验基础理论中的雷诺准则和佛汝德准则从理论上证明了 15 g/L KCl-XGKT 溶液作为 95% 含水率污泥相似溶液的可行性, 然后通过流动混合示踪试验对该理论分析进行验证, 提供了一种寻找流体相似溶液的可行性方法。

2) 研究发现 16 g/L XGKT 溶液与 95% 含水率污泥的流变特性具有很好的相似性。均表现出假塑性非牛顿流体特性, 然而在满足流变相似后黄原胶溶液的密度却小于目标溶液的密度, 不满足同流体运动的相似准则。

3) 添加 KCl 后, 剪切速率在 $(0 \sim 180) \text{ s}^{-1}$ 范围内时, 15 g/L KCl-XGKT 溶液与 95% 含水率污泥流变特性曲线的决定系数分别为 $R^2=0.9953$ (动力黏度)、 $R^2=0.8935$ (剪切应力), 说明在密度相似前提下, 2 种流体具有相似的流变性能。

4) 混合示踪试验和显著性分析表明, 15 g/L KCl-XGKT 溶液不仅具有 95% 含水率污泥的相似流变性能、符合同流体运动的相似准则, 而且还满足示踪混合试验。因此, 15 g/L KCl-XGKT 溶液可以作为污泥的透明相似溶液, 为深入进行污泥厌氧消化流场的可视化研究提供一种可行性方法。

5) 由于消化污泥成分多样、反应器内部结构复杂, 其流变特性和密度受到诸多因素的影响, 而且污泥在消化过程中的生物反应以及产气过程均会使污泥的流变特性和密度发生一定的变化。因此本研究后续将进一步展开工作, 利用黄原胶相似溶液进行 CFD 验证过程中通过检测厌氧消化不同阶段污泥的理化特性参数并同步配制相应浓度的黄原胶透明溶液以进行可视化的验证研究。

[参 考 文 献]

- [1] Kyung M, Wonbae L, Moonil K. Modified anaerobic digestion elutriated phased treatment for the anaerobic co-digestion of sewage sludge and food wastewater[J]. Environmental Technology, 2017, 38(3): 297-304.
- [2] Joel E, Maazuza O, Enda C, et al. Anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludge: A comparative life cycle assessment in the context of a waste service provision[J]. Bioresource Technology, 2017, 223: 237-249.
- [3] 杜连柱, 梁军锋, 杨鹏, 等. 猪粪固体含量对厌氧消化产气性能影响及动力学分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 246-251.
Du Lianzhu, Liang Junfeng, Yang Peng, et al. Influence of total solid content on anaerobic digestion of swine manure and kinetic analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(24): 246-251. (in Chinese with English abstract)

- [4] 陈琳, 李东, 文昊深, 等. 蔬菜废弃物中温厌氧发酵酸化失稳预警指标筛选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 225—230.
Chen Lin, Li Dong, Wen Haoshen, et al. Screening of early warning indicators of instability in anaerobic digestion of vegetable waste under mesophilic condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(1): 225—230. (in Chinese with English abstract)
- [5] Liu C, Li H, Zhang Y, et al. Characterization of methanogenic activity during high-solids anaerobic digestion of sewage sludge[J]. Biochemical Engineering Journal, 2016, 109: 96—100.
- [6] Dai X H, Gai X, Dong B. Rheology evolution of sludge through high-solid anaerobic digestion[J]. Bioresource Technology, 2014, 174: 6—10.
- [7] 戴晓虎, 盖鑫, 董滨. 高含固厌氧消化污泥流变特性[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3912—3918.
Dai Xiaohu, Gai Xin, Dong Bin. Rheological characteristics of sludge in high-solids anaerobic digestion[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3912—3918. (in Chinese with English abstract)
- [8] Kowalczyk A, Harnisch E, Schwede S, et al. Different mixing modes for biogas plants using energy crops[J]. Applied Energy, 2013, 112(16): 465—472.
- [9] Rivard C J, Kay B D, Kerbaugh D H, et al. Horsepower requirements for high-solids anaerobic digestion[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1995, 51/52: 155—162.
- [10] 曹秀芹, 杨平, 赵振东. 污泥流变学及其厌氧消化混合特性数值模拟研究进展[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 997—1003.
Cao Xiuqin, Yang Ping, Zhao Zhendong. Research progress of sludge rheology and numerical simulation of mixing characteristics in anaerobic digestion reactors[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 997—1003. (in Chinese with English abstract)
- [11] Karpinska A M, Bridgeman J. CFD-aided modelling of activated sludge systems: A critical review[J]. Water Research, 2016, 88: 861—879.
- [12] Wu B X, Norton T. Advances in the use of CFD to characterize design and optimize bioenergy systems[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2013, 93(93): 195—208.
- [13] 王瑞利, 温万治. 复杂工程建模和模拟的验证与确认[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(4): 61—68.
Wang Ruili, Wen Wanzhi. Verification and validation of modeling and simulation of complex engineering[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(4): 61—68. (in Chinese with English abstract)
- [14] Terashima M, Goel R, Komatsu K, et al. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(7): 22—28.
- [15] Bi J W, Zhu H G, Shi H X, et al. CFD simulation and temperature field validation of biogas digester mixing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 283—289.
- [16] Dapelo D, Alberini F, Bridgeman J. Euler-Lagrange CFD modelling of unconfined gas mixing in anaerobic digestion[J]. Water Res, 2015, 85: 497—511.
- [17] Tomoaki K, Shotaro A, Hiroki I, et al. High-resolution in-situ LDV monitoring system for measuring velocity distribution in blood vessel[J]. Optics Communications, 2015, 353: 122—132.
- [18] Wick S R, Kahr C M, Han B B. Mass transfer in blood Oxygenators using blood analogue fluids[J]. Biotechnology Progress, 2002, 18(4): 867—873.
- [19] Carlos C, Vitor G, Viriato I V S. Rheological and dynamical characterization of blood analogue flows in a slit[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2014, 46: 17—28.
- [20] Brookshier K A, Tarbell J M. Evaluation of a transparent blood analog fluid: Aqueous xanthan gum/glycerin[J]. Biorheology, 1993, 30(2): 107—116.
- [21] Amanullah A, Buckland B C, Nienow A W. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice[M]. New Jersey John Wiley & Sons, Inc, 2004: 1071—1170.
- [22] Low S C, Parthasarathy R, Slatter P, et al. Hydrodynamics study of sludge in anaerobic digesters[J]. Chemical Engineering, 2012, 29: 1321—1326.
- [23] Cao X Q, Zhao Z D, Cheng L, et al. Evaluation of a transparent analog fluid of digested sludge: xanthan gum aqueous solution[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 31: 735—742.
- [24] Sajjadi B, Raman A A A, Parthasarathy R. Fluid dynamic analysis of non-Newtonian flow behavior of municipal sludge simulant in anaerobic digesters using submerged, recirculating jets[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 298: 259—270.
- [25] 王丽花, 查晓强, 邵钦. 白龙港污水处理厂污泥厌氧消化系统的设计和调试[J]. 中国给水排水, 2012, 28(4): 52—54.
Wang Lihua, Zha Xiaoqiang, Shao Qin. Design and commissioning of sludge anaerobic digestion system in bailonggang wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(4): 52—54. (in Chinese with English abstract)
- [26] 蒋奇海, 葛勇涛, 陈靖轩, 等. 高碑店污水处理厂污泥厌氧消化系统恢复运行的经验[J]. 中国给水排水, 2014, 30(2): 98—101.
Jiang Qihai, Ge Yongtao, Chen Jingxuan, et al. Recovery operation of sludge anaerobic digestion system at gaobeidian WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(2): 98—101. (in Chinese with English abstract)
- [27] 蔺洪永. 郑州市王新庄污水处理厂污泥厌氧消化系统运行影响因素分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2015: 12—13.
Lin Hongyong. Analysis of Sludge Anaerobic Digestion System Factors at Zhengzhou Wangxin Zhuang WWTP[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015: 12—13. (in Chinese with English abstract)
- [28] 吴伟都, 王雅琼, 朱慧, 等. 二价离子对黄原胶溶液流变特性的影响研究[J]. 食品科技, 2012, 37(7): 224—228.
Wu Weidu, Wang Yaqiong, Zhu Hui, et al. Effects of divalent ion on rheological properties of xanthan solution[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(7): 224—228. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李言郡, 朱慧, 吴伟都, 等. 一价阳离子对黄原胶溶液流变特性的影响研究[J]. 中国食品添加剂, 2012(3): 77—81.
Li Yanjun, Zhu Hui, Wu Weidu, et al. Studies on effects of univalent cation on rheological properties of xanthan solution[J]. China Food Additives, 2012(3): 77—81. (in Chinese with English abstract)

- [30] Buswell A M, Jr S F. The mechanism of the methane fermentation[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1948, 70(5): 1778—1780.
- [31] 赵东方. 高含固率污泥厌氧消化搅拌技术及水力特性研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.
Zhao Dongfang. Research on the Stirring Technology and Hydraulic Characteristics of High Solids Content Sludge in Anaerobic Digestion[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [32] 田正宏, 李旭航, 彭志海. 卡波姆凝胶模拟水泥浆体流变性能试验[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(2): 243—248.
Tian Zhenghong, Li Xuhang, Peng Zhihai. Test of carbomer gel to simulate the rheological performance of cement paste[J]. *Journal of Building Material*, 2015, 18(2): 243—248. (in Chinese with English abstract)
- [33] Willie E, Rochefort, Stanley M. Rheology of xanthan gum: salt, temperature, and strain effects in oscillatory and steady shear experiments[J]. *Journal of Rheology*, 1987, 31(4): 337—369.

Analysis on xanthan gum solution to simulate flow performance of digestion sludge

Cao Xiuqin, Yuan Haiguang, Zhao Zhendong, Ding Hao

(Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Anaerobic digestion is a kind of sludge stabilization technology widely used at home and abroad. As an opaque non-Newtonian fluid, it is difficult to obtain the sludge flow characteristics in the digester exactly. Hence, it is necessary to find a sort of transparent fluid to replace it. To ensure the reliability of flow characteristics obtained from transparent analog fluid, it is indispensable to verify the flow similarity with main physical property of the fluid. The feasibility of xanthan gum transparent solution as a similarity solution of digestion sludge was analyzed according to the rheological property and density, respectively, based on the similarity criteria of fluid flow. Under the premise of satisfying the geometric similarity, the Reynolds criterion and the Froude criterion should be met simultaneously, that is, the Reynolds number and the Froude number of 2 kinds of fluids should be equal. The rheological parameter and density of 95% water content digestion sludge and xanthan gum solution at different concentrations were measured by rotating viscometer and gravimetric method severally. The rheological curve of 2 kinds of fluids was tested for a goodness-of-fit, and curve regression effect was characterized by the determination coefficient R^2 on the principle of regression analysis. First, the xanthan gum solution of 13, 16, and 19 g/L was prepared. It was found that the rheological curves of the 16 g/L xanthan gum solution were similar to those of digestion sludge, and both of them were pseudo plastic non-Newtonian fluid, indicating that this xanthan gum solution could replace the sludge as a similarity solution. But, the xanthan gum solution's density was smaller than that of the target fluid in this recipe, which did not conform to the fluid flow similarity criteria. So, for adjusting the density disparity, xanthan gum solution of 14, 15, and 16 g/L was made by using KCl solution as the solvent instead of aqueous solution. Because of the fact that the salt screens the electrostatic repulsions of the trisaccharide side chains, the adoption of a helical backbone conformation is allowed, which in turn promotes the increased association of the ordered xanthan molecules in solution. With the addition of KCl, the rheological curves of 15 g/L xanthan gum solution were in reasonable agreement with those of digestion sludge, which were also typical pseudo-plastic non-Newtonian fluid. The determination coefficients of rheological curve of 2 kinds of fluids were $R^2=0.9953$ (viscosity curve) and $R^2=0.8935$ (shear stress curve), separately, showing the highest similarity. Tracing test of mixing performance displayed that tracer concentrations at the outlet in these 2 kinds of fluids had the same tendency with the change of time. The result of Welch's t -test demonstrated that there was no significant difference in the rheological parameter and density of the 2 kinds of fluids at the significant level of 0.05. Given above logical analysis, it should be pointed out that xanthan gum transparent solution used as a similarity solution of digestion sludge is acceptable, which can be used as a basis method for the flow visualization in the anaerobic digester. Generally, future work should focus on applying transparent similarity solution to validate computational fluid dynamics simulation from the perspective of reducing energy consumption and improving biogas yield.

Keywords: sludges; fluids; digestion; xanthan gum solution; similarity solution; tracer experiment; Welch's t -test