

DOI: 10.7652/xjtuxb201711009

高含固污泥临界剪切应力影响因素的研究

董登志, 张静思, 吴志根, 李卓
(同济大学环境科学与工程学院, 200092, 上海)

摘要: 为了进一步研究高含固污泥的流变特性,根据污泥含固率 r_{TS} 选择改进的 Herschel-Bulkley 流变模型,以模拟污泥在反应器中的合理流动,并对污泥种类、含固率、剪切速率范围、温度对高含固污泥流变曲线中临界应力的影响进行了实验研究。实验中采用含固率 r_{TS} 为 5.2%~15.8% 的厌氧消化污泥,在 $0.01\sim1\,000\text{ s}^{-1}$ 的剪切速率范围内进行稳态流变特性的测试。结果表明:当 $r_{TS}<8.8\%$ 时,流变曲线符合 Herschel-Bulkley 模型;当 $r_{TS}>8.8\%$ 时,流变曲线在 $1\sim10\text{ s}^{-1}$ 内出现临界剪切应力,符合改进的 Herschel-Bulkley 模型;临界剪切应力与污泥含固率、剪切速率范围有关,与污泥的种类、成分组成、测试温度以及厌氧消化时间无关;临界剪切应力对应的临界剪切速率 $\dot{\gamma}_c$ 与含固率之间呈线性关系。该结果可为污泥物理化学性质研究提供一定的参考。

关键词: 高含固污泥;流变特性;临界剪切应力;改进的 Herschel-Bulkley 模型

中图分类号: O373 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0057-06

Effect of High-Solid Sewage Sludge on Critical Shear Stress

DONG Dengzhi, ZHANG Jingsi, WU Zhigen, LI Zhuo

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To further study the rheological characteristics of high-solid sewage sludge, revised Herschel-Bulkley model was selected according to total solid (r_{TS}) of sludge to simulate flow behavior within digesters reasonably. The effects of sludge type, total solid, the range of shear rate, temperature on the critical shear stress in the flow curve were investigated in the experiments. Anaerobic digested sludge with total solid of 5.2%-15.8% was sheared by employing shear rate sweep ranging from 0.01 s^{-1} to $1\,000\text{ s}^{-1}$ for steady rheological tests. The results indicate that for the sludge with $r_{TS}<8.8\%$, the flow curve is well fitted by Herschel-Bulkley model. While for the sludge with $r_{TS}>8.8\%$, a critical shear stress appears in the flow curve within the range of $1\sim10\text{ s}^{-1}$, and the flow curve is fitted by the revised Herschel-Bulkley model. The critical shear stress is correlated to the total solid and the range of applied shear rate, but not to sludge type, composition, tested temperature or digestion time. The critical shear rate $\dot{\gamma}_c$ corresponding to the critical shear stress shows a linear relationship with r_{TS} of digested sludge.

Keywords: high-solid sludge; rheological behaviors; critical shear stress; revised Herschel-Bulkley model

近年来城市人口急剧增多使得污水产量大幅增加,环境法律法规日趋严格使得污水处理的标准提

高,由此导致污水处理厂的城市污泥产量大幅增加。城市污泥主要由有机物、无机物、微生物,水等物质构成^[1]。大量的剩余城市污泥不仅侵占地表空间,而且释放出难闻的气味,对环境和人体健康造成巨大的危害,脱水和厌氧消化是城市污泥减量化和稳定化的主要处理方法^[2]。为了方便城市污泥的运输和集中处理,80%以上的污泥在进一步处理处置之前都要经过浓缩脱水^[3]。污泥中固体的质量分数(含固率) $r_{TS}>10\%$ 的污泥称为高含固污泥^[4],厌氧消化技术在降解有机物的同时能够产生甲烷等二次能源从而广泛应用于污泥的处理中^[5],经过不同污水处理方法得到的污泥性质、组分不同,流变特性也不同^[6]。脱水污泥主要由初沉泥和二沉泥浓缩脱水得到,污泥颗粒主要由范德华力、氢键、化学键等作用力结合^[7]。Zhang 等指出污泥经过热水解后,释放出胞内细胞质,使得大分子物质降解成小分子溶解有机物^[2]。Forster 等指出厌氧消化污泥富含蛋白质和糖类,污泥颗粒间的作用力主要是静电引力^[8]。污泥的流变特性是厌氧消化单元过程设计、装置运行和管理过程中的重要参数^[9]。为了使高含固污泥能够在厌氧反应器的混合、搅拌过程中产生合理的流动从而提高反应效率,对污泥流动特性的研究及流变模型的选择是十分必要的。描述污泥流变特性的模型主要有 Bingham 模型、Herschel-Bulkley 模型和 Ostwald 模型等,其中 Herschel-Bulkley 模型能够较为准确地描述浓缩污泥的流变特性^[10]。影响污泥流变特性的因素有含固率、温度、胞外聚合物、污泥颗粒表面电荷等,其中含固率、温度是影响污泥流变特性的重要因素^[11]。一般认为污泥黏度随含固率的增加而增大,随温度的升高而减小^[12]。Eshtiaghi 等指出,在 1.4%~7%的含固率范围内,不同含固率污泥的流动曲线均可用无量纲的 Herschel-Bulkley 模型主曲线来拟合^[13]。

不同国家和地区所产生污泥的物理、化学性质不同,研究污泥流变特性的剪切速率范围、含固率范围也不相同。Dai 等在 10~1 000 s⁻¹内研究了 $r_{TS}>12\%$ 的厌氧消化污泥^[14]。Jiang 等在 0.1~10 s⁻¹内对 r_{TS} 为 14.9%的厌氧消化污泥进行了流变曲线测试^[15]。Markis 等在 0.1~1 000 s⁻¹内研究了 r_{TS} 为 3%~7%的初沉泥、二沉泥及厌氧消化污泥的混合物,其他的相关研究则主要针对 $r_{TS}<10\%$ 的低含固污泥。Zhang 等在 0.01~1 000 s⁻¹内对 r_{TS} 为 20%的高含固厌氧消化污泥进行了测试^[9],在低剪切率 1~10 s⁻¹内发现临界应力出现并提出了

改进的 Herschel-Bulkley 模型,但并未指出改进模型的适用范围。

本实验采用脱水、厌氧消化、热水解污泥在 0.01~1 000 s⁻¹剪切范围内对污泥进行流变测试,研究污泥的种类是否对流变曲线中临界剪切应力的出现有影响。以厌氧消化污泥为例,研究了温度和含固率是否对污泥流变曲线中临界剪切应力的出现有影响,确定了临界剪切应力对应的临界剪切速率 $\dot{\gamma}_c$ 与污泥含固率 r_{TS} 之间的关系。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

本实验采用来自上海市政污水处理厂的脱水污泥。将脱水污泥投加到连续运行的有效容积为 12 L 的 35℃中温厌氧消化反应器中,污泥停留 20 d 后得到较为稳定的高含固厌氧消化污泥。

将盛有 300 g 脱水泥的铝制容器放入高温高压热水解反应器进行水浴加热。密闭条件下,脱水泥在 180℃的饱和蒸气压下加热 60 min 得到热水解泥。整个热水解过程中,污泥均处于搅拌状态,从而有利于污泥的传热传质。在流变测试实验前,污泥均置于 4℃冰箱中贮存以抑制生物活性。

1.2 实验装置及测试方法

将稳定后的脱水泥、厌氧消化泥、热水解污泥取出,分别在 105℃烘箱中放置 24 h,以测定污泥的含固率,随后将干污泥放置在 600℃的马弗炉中 2 h,测定污泥的挥发性组分(VS)含量质量分数 $r_{VS/TS}$,3 种污泥的基本物性指标如表 1 所示。

表 1 3 种污泥的基本物性指标

污泥种类	$r_{TS}/\%$	$r_{VS/TS}/\%$
脱水泥	11.9	63.9
厌氧消化泥	15.8	40.1
热水解泥	16.4	50.1

用超纯水对 15.8%厌氧消化污泥进行稀释,得到含固率为 14.5%、13.2%、12%、10%、8.8%、6.8%、5.2%的厌氧消化污泥样品。采用应力控制的马尔文旋转流变仪测量污泥的各项流变指标。该流变仪配有同轴圆筒和转子,圆筒内径为 27.5 mm,转子直径为 25 mm,圆筒内表面粗糙,可有效防止污泥在壁面滑移。流变仪与循环换热器连接,以保证样品处于指定温度下进行流变测试。本实验所有样品在测试之前先在 1 000 s⁻¹的剪切速率下预剪切 5 min,然后在 0.01~1 000 s⁻¹剪切速率范

围内研究不同温度 15~85 ℃ 和含固率为 5.2%~15.8% 时对污泥流变特性的影响。

2 结果与讨论

2.1 实验数据可信度表征

为验证本实验仪器测试方法的准确性、可靠性,实验采用 r_{TS} 为 13.5% 的厌氧消化污泥测试污泥流变曲线,重复测试 3 次,测量偏差用误差棒进行表征。含固率为 13.5% 的厌氧消化污泥在 35 ℃ 下的流变曲线如图 1 所示,测量偏差在 6.8% 以内,因而实验数据可靠。

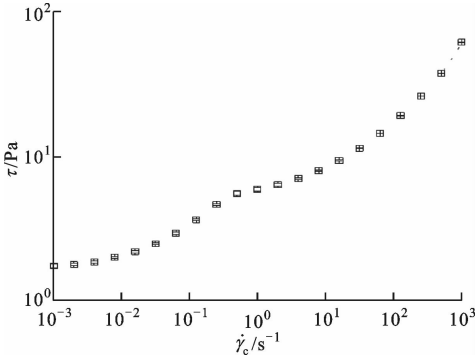


图 1 含固率为 13.5% 的厌氧消化污泥在 35 ℃ 下的流变曲线

2.2 流变曲线

不同种类污泥的流变曲线如图 2 所示,脱水污泥、厌氧消化污泥、热水解污泥均表现为具有屈服应力的假塑性流体。污泥黏度随剪切速率的增加而减小,具有剪切变稀的特性。不同种类污泥流变曲线在 1~10 s⁻¹ 内均出现一个临界剪切应力,将流变曲线分为两段。不同种类污泥的成分组成并不相同,这说明临界剪切应力的出现与污泥的组分无关。Zhang 等对 $r_{TS}>20\%$ 时的高含固厌氧消化污泥进行研究,在污泥流变曲线中观察到了临界剪切应力^[9],并以临界剪切应力为分界点,得到改进的 Herschel-Bulkley 模型

$$\tau = \begin{cases} \tau_y + K_1 \dot{\gamma}^{n_1}, & \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c \\ \tau_c + K_2 \dot{\gamma}^{n_2}, & \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力; $\dot{\gamma}_c$ 为剪切速率; τ_y 为污泥的屈服应力; $\dot{\gamma}_c$ 、 τ_c 分别为临界剪切速率、临界剪切应力; K_1 、 K_2 、 n_1 、 n_2 为拟合参数。

2.3 温度对污泥流变曲线的影响

含固率为 15.8% 的厌氧消化污泥在不同温度下的流变曲线如图 3 所示,可知温度越高、剪切速率越大,则污泥的黏度 η 越低、流动性越好,表现出剪

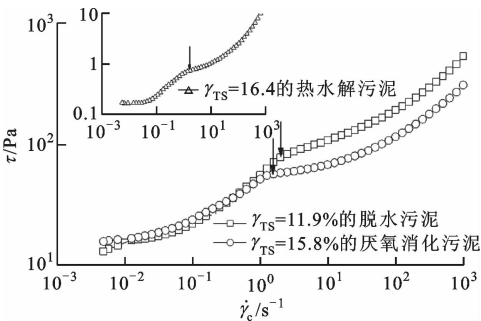


图 2 不同种类污泥在 15 ℃ 下的流变曲线

切变稀的特性。温度效应的实质在于其影响了污泥颗粒的运动性能,温度越高污泥颗粒的热运动越强烈,颗粒间相互作用力减小,从而污泥黏度下降^[12]。由图 3 可知,不同温度的流变曲线在剪切速率 1~10 s⁻¹ 内均出现临界剪切应力,将流变曲线分为两段,以临界剪切应力为分界点,用式(1)所提模型进行拟合,拟合参数如表 2 所示。由表 2 可知, τ_y 、 τ_c 、 K_1 、 K_2 均随温度的升高呈现减小的趋势, n_1 、 n_2 随温度的变化不大。

表 2 $r_{TS}=15.8\%$ 时不同温度下改进 Herschel-Bulkley 模型的拟合参数

$T/^\circ\text{C}$	τ_y/Pa	K_1	n_1	τ_c/Pa	K_2	n_2	拟合优度
15	10.19	39.29	0.46	52.85	3.63	0.61	0.99
25	9.71	32.88	0.46	51.55	2.85	0.63	0.99
35	12.61	25.20	0.58	51.07	2.20	0.64	0.99
45	11.74	20.65	0.62	50.08	1.42	0.67	0.99
55	8.15	13.88	0.73	38.33	0.79	0.69	0.99
65	5.34	11.67	0.57	27.68	0.67	0.66	0.99
75	9.39	7.98	0.66	22.02	0.45	0.67	0.99
85	4.55	12.03	0.45	21.13	0.21	0.78	0.99

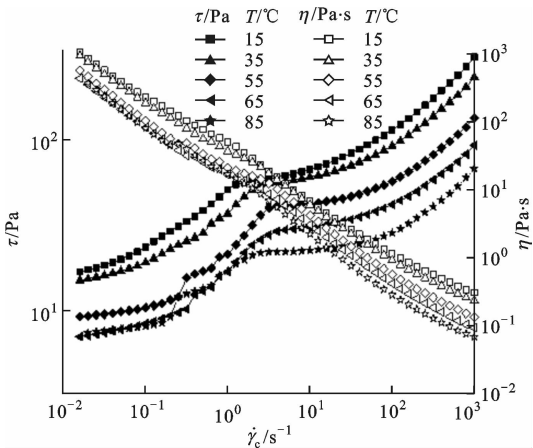


图 3 r_{TS} 为 15.8% 的厌氧消化污泥在不同温度下的流变曲线

2.4 含固率对污泥流变曲线的影响

污泥含固率是影响污泥流变特性的另一项重要因素。污泥中含有污泥颗粒及大分子物质,二者之间相互联结缠绕,形成网状结构。中温厌氧消化在工程中的应用较为普遍,故本实验研究 35℃ 下污泥含固率对厌氧消化污泥流变特性的影响,结果如图 4 所示,可知剪切应力和黏度均随含固率增加而增大。含固率增大时,污泥颗粒及大分子间的相互作用增强,颗粒间的作用力增加,从而形成一个更加稳固的网络结构^[12]。当 $r_{TS} < 8.8\%$ 时,厌氧消化污泥的流变曲线是一条平滑曲线,符合 Herschel-Bulky 模型;当 $r_{TS} > 8.8\%$ 时,流变曲线在 $1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 内开始出现临界剪切速率 $\dot{\gamma}_c$, 并且其值随污泥含固率的增加而增大。 r_{TS} 为 15.8% 的厌氧消化污泥在 35℃ 下的典型蠕变曲线如图 5 所示。Baudez 等将 $\tau < \tau_1$ 的 I 区定义为污泥的线性黏弹区,弹性力占主导作用; $\tau > \tau_1$ 时污泥结构开始破裂,黏性力产生并和弹性力共同主导污泥的流变性,故将污泥 $\tau_1 < \tau < \tau_2$ 的 II 区称为非线性黏弹区; $\tau > \tau_2$ 时,污泥颗粒间的弹性力作用可忽略,黏性作用力起主导,将 III 区称为纯黏性区^[16]。Zhang 等指出,可将 τ_c 看作非线性黏弹区和纯黏性区的临界剪切应力,与 τ_2 具有相同的物理意义^[9]。将流变曲线中的 τ_c 与蠕变曲线中的 τ_2 进行比较, τ_c 、 τ_2 均随污泥含固率增加呈抛物线形式增大,二者数值之间的微小差异可看作测试方法不同所致,结果如图 6 所示。因此,流变曲线中临界剪切应力 τ_c 可看作黏性力和弹性力相等的平衡点。当 $r_{TS} < 8.8\%$ 时,污泥颗粒间的相互作用力较弱,污泥的黏性力起主导作用,流变曲线是一条光滑曲线,能够用 Herschel-Bulkley 模型进行很好的拟合。当 $r_{TS} > 8.8\%$ 时,污泥颗粒间的作用力开始大幅增加,尤其是在低剪切力下污泥颗粒间的弹性力作用不可忽略,流变曲线中开始出现临界剪切应力。在 $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c$ 的低剪切力下,污泥颗粒间的黏性力和弹性力二者共同作用对污泥的流动产生影响,受破坏的污泥结构可通过污泥颗粒间的相互作用进行结构重建;当 $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$ 时,黏性力作用占主导作用,污泥产生稳态流动并且不再进行结构的重建。所以,当 $r_{TS} > 8.8\%$ 时,污泥的流变曲线需用式(1)进行拟合。Chaignon 等通过实验得出结论:在低剪切力下,受到破坏的污泥结构会通过污泥颗粒间的相互作用进行再絮凝^[17];在高剪切作用下污泥结构完全被破坏,污泥不再进行絮凝作用并且产生稳态流,这一结论与本文实验结果一致。

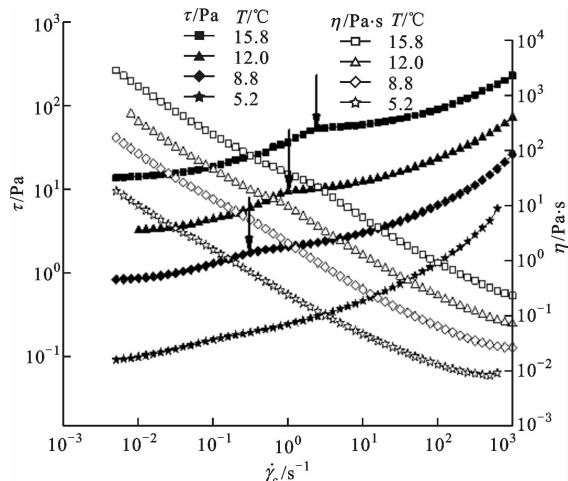


图 4 $T=35^\circ\text{C}$ 时 r_{TS} 对厌氧消化污泥流变曲线的影响

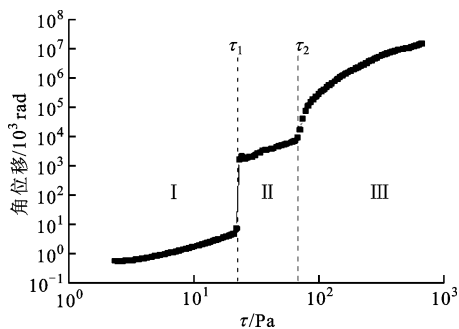


图 5 r_{TS} 为 15.8% 的高含固厌氧消化污泥在 35℃ 下的蠕变曲线

由图 6 可知, τ_1 、 τ_2 和 τ_y 、 τ_c 均随污泥含固率增加以抛物线形式增大,其中 τ_1 是线性黏弹区和非线性黏弹区的分界点, τ_2 是非线性黏弹区和黏性区的分界点。这表明污泥含固率越高,污泥颗粒间的相互作用越强,当污泥含固率超过 8.8% 时, τ_y 、 τ_c 、 τ_1 、 τ_2 均开始加速增大,说明污泥颗粒及大分子间的缠绕联结作用迅速增强。当污泥含固率大于 8.8% 时, τ_y 和 τ_c 的差值以及 τ_1 和 τ_2 的差值开始增大,临界剪切应力开始出现。 $\tau_c - \tau_y$ 和 $\tau_2 - \tau_1$ 的值越大,流变曲线中临界剪切应力越显著;反之越小,临界剪切应力越不明显。

临界剪切速率 $\dot{\gamma}_c$ 随含固率 r_{TS} 的变化曲线如图 7 所示,可知污泥含固率越大, $\dot{\gamma}_c$ 越大。用线性回归对 $\dot{\gamma}_c$ 和 r_{TS} 进行拟合,发现二者之间呈线性关系,且拟合优度为 0.95 说明拟合度较好。 $\dot{\gamma}_c$ 和 r_{TS} 之间呈线性关系这一结论在污泥的处理过程中具有重要意义。对于厌氧消化污泥,在 $0.01 \sim 1\,000 \text{ s}^{-1}$ 范围内,当 $r_{TS} < 8.8\%$ 时污泥流变曲线是光滑的,可以对 Herschel-Bulkley 模型进行很好的拟合。对于含固率 r_{TS} 超过 8.8% 的厌氧消化污泥,已知污泥的含固

率 r_{TS} ,可由线性关系计算出流变曲线中的临界剪切应力所对应的临界剪切速率。当剪切速率范围内不包含 $\dot{\gamma}_c$ 时,采用 Herschel-Bulkley 模型进行拟合。当剪切速率范围内包含 $\dot{\gamma}_c$ 时,采用改进的Herschel-Bulkley 模型进行拟合。

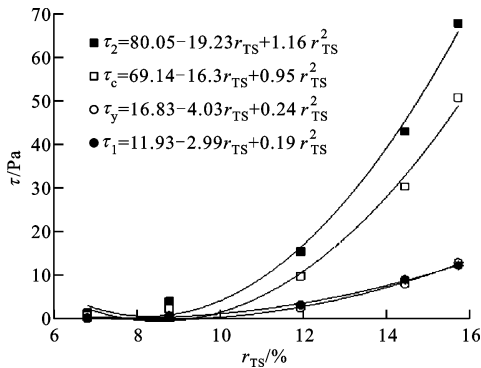


图 6 污泥含固率对剪切应力 τ_y 、 τ_c 和 τ_1 、 τ_2 的影响

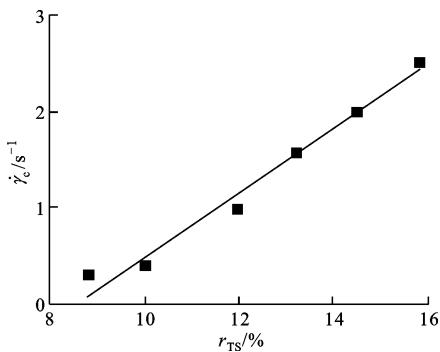


图 7 临界剪切速率 $\dot{\gamma}_c$ 随含固率 r_{TS} 的变化

3 结 论

本文对污泥种类、含固率、剪切速率范围、温度对高含固污泥流变曲线中临界应力的影响进行了研究。结果发现:流变曲线中是否出现临界剪切应力与污泥含固率和剪切速率范围有关,而与污泥的种类、成分组成、测试温度以及厌氧消化时间无关。对于厌氧消化污泥, $r_{TS} < 8.8\%$ 时,符合 Herschel-Bulkley 模型; $r_{TS} > 8.8\%$ 时,临界剪切速率 $\dot{\gamma}_c$ 开始出现。若剪切速率范围内不包含临界剪切速率,采用 Herschel-Bulkley 模型进行拟合。若剪切速率范围内包含临界剪切速率,则采用改进的 Herschel-Bulkley 模型进行拟合。研究发现:流变曲线中临界剪切应力对应的临界剪切速率 $\dot{\gamma}_c$ 与污泥含固率 r_{TS} 之间呈线性关系。因此,可根据污泥含固率 r_{TS} 确定临界剪切速率,选择合适的流变模型,以准确预测污泥流变特性,使污泥在反应器中较为合理地流动,从而提高厌氧消化反应效率。

参考文献:

[1] BAUDEZ J C, SLATTER P, ESHTIAGHI N. The impact of temperature on the rheological behaviour of anaerobic digested sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 215: 182-187.

[2] ZHANG J, XUE Y, ESHTIAGHI N, et al. Evaluation of thermal hydrolysis efficiency of mechanically dewatered sewage sludge via rheological measurement [J]. Water Research, 2017, 116: 34-43.

[3] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考 [J]. 给水排水, 2012, 38(2): 1-5.

DAI Xiaohu. Consideration of sludge present situation and disposal of cities and towns in our country [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(2): 1-5.

[4] 孙晓. 高含固率污泥厌氧消化系统的启动方案与实验 [J]. 净水技术, 2012, 31(3): 78-82.

SUN Xiao. Experiment and start-up solution of anaerobic digestion system for high-solid content sludge [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(3): 78-82.

[5] 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.

[6] MARKIS F, BAUDEZ J C, PARTHASARATHY R, et al. Predicting the apparent viscosity and yield stress of mixtures of primary, secondary and anaerobically digested sewage sludge: simulating anaerobic digesters [J]. Water Research, 2016, 100: 568-579.

[7] BAYOUDH S, OTHMANE A, MORA L, et al. Assessing bacterial adhesion using DLVO and XDLVO theories and the jet impingement technique [J]. Colloids Surfaces; B Biointerfaces, 2009, 73 (1): 1-9.

[8] FORSTER C F. Bound water in sewage sludges and its relationship to sludge surfaces and sludge viscosities [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2010, 33(1): 76-84.

[9] ZHANG J, HAWARD S J, WU Z, et al. Evolution of Rheological characteristics of high-solid municipal sludge during anaerobic digestion [J]. Applied Rheology, 2016, 26(3): 9-18.

[10] SEYSSIECQ I, FERRASSE J H, ROCHE N. State-of-the-art: rheological characterisation of wastewater treatment sludge [J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 16(1): 41-56.

- [11] 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 (3): 227-233.
- [12] 王远. 污泥厌氧消化流变特性变化规律的研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2015: 16-23.
- [13] ESHTIAGHI N, MARKIS F, ZAIN D, et al. Predicting the apparent viscosity and yield stress of digested and secondary sludge mixtures [J]. *Water Research*, 2016, 95: 159-164.
- [14] DAI X, GAI X, DONG B. Rheology evolution of sludge through high-solid anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 174: 6-10.
- [15] JIANG J, WU J, PONCIN S, et al. Rheological characterization of digested sludge by solid sphere impact [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218: 301-306.
- [16] BAUDEZ J C, COUSSOT P. Rheology of aging, concentrated, polymeric suspensions: application to pasty sewage sludges [J]. *Journal of Rheology*, 2001, 45 (5): 1123-1139.
- [17] CHAIGNON V, LARTIGES B S, EI S, et al. Evolution of size distribution and transfer of mineral particles between flocs in activated sludges: an insight into floc exchange dynamics [J]. *Water Research*, 2002, 36(3): 676-684.

(编辑 赵炜 苗凌)

(上接第56页)

- [13] LI W G, LI G, JIN C Z, et al. One-step synthesis of nanorod-aggregated functional hierarchical iron-containing MFI zeolite microspheres [J]. *Journal of Materials Chemistry: A*, 2015, 3(28): 14786-14793.
- [14] LEE J, HONG U G, HWANG S, et al. Catalytic cracking of C5 raffinate to light olefins over lanthanum-containing phosphorous-modified porous ZSM-5: effect of lanthanum content [J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 109: 189-195.
- [15] ZHANG L K, QU S D, WANG L, et al. Preparation and performance of hierarchical HZSM-5 coatings on stainless-steel microchannels for catalytic cracking of hydrocarbons [J]. *Catalysis Today*, 2013, 216: 64-70.
- [16] GROEN J C, MOULIJN J A, PÉREZ R J. Desilication: on the controlled generation of mesoporosity in MFI zeolites [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2006, 16(22): 2121-2131.
- [17] LOUIS B, OCAMPO F, YUN H S, et al. Hierarchical pore ZSM-5 zeolite structures: From micro-to macro-engineering of structured catalysts [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 161(3): 397-402.
- [18] CHOI M, NA K, KIM J, et al. Stable single-unit-cell nanosheets of zeolite MFI as active and long-lived catalyst [J]. *Nature*, 2009, 461(7261): 246-249.
- [19] HUANG D, RUAN B, WU X Y, et al. Experimental study on heat transfer of aviation kerosene in a vertical upward tube at supercritical pressures [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, 23(2): 425-434.
- [20] WLOCH J. Effect of surface etching of ZSM-5 zeolite crystals on the rate of n-hexane sorption [J]. *Micro- porous and Mesoporous Materials*, 2003, 62(1/2): 81-86.
- [本刊相关文献链接]
- 王洪乐,王家序,周青华,等. 基于BP神经网络的数控机床综合误差补偿方法. 2017, 51(6): 138-146. [doi:10.7652/xjtuxb201706022]
- 陈以磊,邱志惠,郭俊康,等. 概念设计阶段机床基础大件质量的优化方法. 2017, 51(7): 105-114. [doi:10.7652/xjtuxb201707016]
- 赵永强,赵升吨,魏伟锋,等. 螺杆转子磨削及计算机数控砂轮修整. 2016, 50(8): 6-14. [doi:10.7652/xjtuxb201608002]
- 刘鹏,洪军,刘志刚,等. 采用自适应遗传算法的机床公差分配研究. 2016, 50(1): 115-123. [doi:10.7652/xjtuxb201601018]
- 高美明,洪军,甄宜超. 机床多体系统空间刚度场约束下的加工误差预测. 2016, 50(6): 90-96. [doi:10.7652/xjtuxb201606014]
- 田红亮,郑金华,陈甜敏,等. 直线运动滚动导轨副的法向接触力学模型. 2016, 50(5): 1-11. [doi:10.7652/xjtuxb201605001]
- 胡小秋,陈维福. 角接触球轴承热特性分析及试验. 2015, 49(2): 106-110. [doi:10.7652/xjtuxb201502018]
- 喻明让,张英杰,陈琨,等. 考虑调整时间的作业车间调度与预防性维修集成方法. 2015, 49(6): 16-21. [doi:10.7652/xjtuxb201506003]
- 邵国强,朱林波,洪军,等. 重卡螺栓连接扭矩-预紧力关系影响因素分析. 2015, 49(10): 14-21. [doi:10.7652/xjtuxb201510003]
- 牟恩旭,马振群,冯斌,等. 利用数控机床换向特性分析的摩擦误差补偿方法. 2014, 48(8): 47-53. [doi:10.7652/xjtuxb201408009]

(编辑 荆树蓉)