浓度对高固体污泥热水解特性及流动性的影响

马俊伟[1]，曹芮[1]，周刚[1]，乔玮[2]，王伟[2]
(1. 北京师范大学环境学院，水环境模拟国家重点实验室，北京 100875；2. 清华大学环境科学与工程系，北京 100084)

摘要：考察固体浓度为 7%、9% 和 13% 的高固体污泥的热水解特性，通过生化甲烷潜能(BMP)试验，考察热水解处理高固体污泥厌氧消化性能的变化，通过流变性试验，考察污泥浓度与流动性的关系. 结果表明，随着热水解时间延长，污泥中有机物溶解率增大，30 min 后变化趋于平缓. 水解效率受固体浓度影响，浓度 7% 污泥的有机物溶解率高于 9% 和 13% 的污泥. 170℃ 热水解 30 min，7% 的污泥 SS、VSS 和 COD 的溶解率分别为 43%、47% 和 42%，VFA/SCOD 为 20.2%. 热水解污泥厌氧消化性能提高，相比未经热水解处理的污泥，浓度 7%、9% 和 13% 的污泥在 170℃ 热水解 30 min 后产气量分别增加了 44%、27% 和 9%，沼气产率分别增加了 63%、74% 和 37%. 固体浓度对污泥厌氧消化性能的影响显著，浓度 9% 的污泥产气中甲烷含量以及沼气产率均高于 7%、13% 的污泥. 固体浓度 <9% 时，污泥屈服应力增长缓慢，固体浓度大于 9% 时，污泥屈服应力增长快速，流动性急剧下降.

关键词：高固体污泥；热水解；固体有机物；厌氧消化；屈服应力
中图分类号：X705　**文献标识码**：A　**文章编号**：0250-3301(2010)07-1583-07

Effect of Solid Content on Thermal Hydrolysis Characteristics and Flowability of High Solid Content Sewage Sludge

MA Jun-wei[1], CAO Rui[1], ZHOU Gang[1], QIAO Wei[2], WANG Wei[2]
(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Thermal hydrolysis characteristics of high solid content (7%, 9% and 13%) sludge were studied by thermal hydrolysis test. Anaerobic biodegradation of treated and untreated sludge and the relation of sludge flowability and sludge solid content were tested by biochemical methane potential (BMP) procedure and rheological test, respectively. Results show that the dissolving ratio of solid organics increase with the prolonging of thermal hydrolysis time, and solid organics dissolve slowly after 30 min. Solid organics dissolving ratio of sludge with 7% solid content is higher than that of 9% and 13% sludge. The dissolving ratio of suspended solid (SS), volatile suspended solid (VSS) and COD of sludge with 7% solid content at 170℃ with 30 min were 43%, 47%, 42% respectively, and VFA/SCOD is 20.2%. Anaerobic biodegradation of treated sludge is improved. Methane production of 7%, 9% and 13% sludge at 170℃ with 30 min were 44%, 27% and 9% higher than that of untreated sludge. Methane production ratios increased 63%, 74% and 37% respectively. Methane content and methane production ratio of 9% sludge is higher than that of 7% and 13% sludge. Yield stress increases slowly with the increasing of solid content when solid content is lower than 9%, and it increases much faster and leads a steep decrease of sewage sludge flowability as solid content is higher than 9%.

Key words: high solid content sludge; thermal hydrolysis; solid organics; anaerobic biodegradation; yield stress

热水解技术能有效破碎细胞，强化污泥的水解，是一种具有实用价值的污泥处理技术[1,2]. 污泥在热水解处理过程中，微生物絮体解体，微生物细胞破裂，细胞的有机质被释放出来并进一步水解. 由于固体有机物的溶解和水解，污泥的厌氧消化性能得到改善，可提高厌氧消化效率、增大甲烷产量. 20 世纪 70 年代前，热水解技术主要用于改善污泥的脱水性能，70 年代末开始用于提高污泥的厌氧消化性能的研究. 从 1978 年 Haug 等[3] 报道热水解能显著改善污泥的厌氧消化性能以来，热水解技术已成为改善污泥厌氧消化性能的重要技术[4~6]. 污泥的“热水解-厌氧消化”联合工艺得到美国、德国、日本、丹麦等国的重视并应用[7~9]. Haug 等[3] 发现在 100 ~ 175℃ 热处理 3 min，剩余污泥产气率可提高 14% ~ 57%. Li 等[8] 发现剩余污泥在 175℃、60 min 条件下热处理效果较好，热处理后污泥在停留时间 5 d 时，COD 可以去除 60% 以上. Stuckey 等[10] 发现对于剩余污泥，改善消化性能的最佳热处理温度在 175℃ 左右，高于这一温度区间，热处理起反作用. 王治军等[11] 将热水解预处理后的污泥进行厌氧消化试验，发现最适宜的热水解条件为 170℃、30 min，此条件下污泥厌氧消化中 COD 去除

收稿日期：2009-09-22；修订日期：2010-01-04
基金项目：国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z384，2008AA06A404)
作者简介：马俊伟(1971 ~)，女，博士，副教授，主要研究方向为固体废物资源化与处理处置，E-mail: jwma@bnu.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率从预处理前的 38.11% 提高到 56.78%.

以往关于污泥的热水解预处理研究多以含水率 >95% 的浓缩污泥为对象，将污泥加热到 170℃ 左右，由于水的汽化潜热大，加热时大部分能量消耗在加热污泥中大量的水分上，“热水解-厌氧消化”工艺能耗较大. 若以含水率 85% 左右的脱水泥饼进行热水解，整个工艺能耗约降低 60% [12]. 但脱水泥饼的流动性不佳，不仅影响物料输送，其传热传质性能也不好，须将其调至适当的浓度，使其具备工程应用连续输送需要的流动性. 故本研究对高固体污泥(将脱水泥饼适当稀释后的含固率较高的污泥)进行热水解，考察高固体污泥中有机物的水解特性、污泥厌氧消化性能以及污泥浓度与流动性的关系，确定适合热水解的污泥浓度范围，使其既满足需要，又能最大程度地减少整个工艺能耗，以期为高固体污泥“热水解-厌氧消化”的工程应用提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 污泥热水解试验

试验用泥为北京某污水处理厂的脱水泥饼，含水率约为 80%，有机物含量约为污泥干重的 70%. 污泥加水稀释至固体浓度 7%、9%、13%，在搅拌机上高速打碎后得到本试验所用高固体污泥. 稀释污泥于 4℃ 冰柜中保存. 稀释污泥的性质如表 1 所示.

热水解试验采用自行设计的圆柱形反应罐(450 mL)，反应罐的罐体、罐盖等采用不锈钢制成，具有良好的防腐蚀性和密封性. 加热设备采用 HH-数显恒温油浴槽. 待反应罐中温度达到设定温度后，分别保持 10、15、20、30、45、60 min，定义为热水解时间. 反应温度为 170℃.

表 1 污泥的基本性质[1)]

Table 1 Characteristics of sludge

污泥含固率/%	pH	TS/%	VS/%	SS/%	VSS/%	TCOD/g·L^{-1}	SCOD/g·L^{-1}
7	5.93	6.98	5.03	6.62	4.77	79.7	17.14
9	5.88	8.95	6.39	8.69	6.26	115.5	19.40
13	5.67	13.40	9.69	13.4	9.65	133.9	—

1)污泥浓度以 3 种污泥的质量分数表示

1.2 BMP 试验

BMP 试验装置如图 1 所示，250 mL 锥形瓶置于 35℃ 恒温水浴中，玻璃瓶口连出导气管，接到倒置于水槽中的量筒中，用排水法收集沼气.

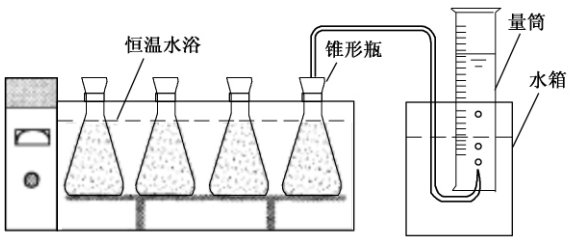

图 1 BMP 试验装置

Fig. 1 Device of biochemical methane potential procedure

分别对经热水解处理 30 min 后的污泥与未经热水解处理的污泥进行 BMP 试验. 试验中严格控制每种样品的添加量，使得瓶中有机负荷相等，均为 8.4 kg/m^3. 接种污泥为污水厂消化污泥，接种量 150 g，试验周期 30 d. 试验开始 5 d，每天记录 1 次产气量，之后每 2 d 记录 1 次. 每 5 d 分析 1 次沼气成分. 分别分析试验前后的 TS、VS、COD 等指标.

1.3 污泥流变学试验

使用自制仪器进行简易流变学试验，考察污泥屈服应力与浓度的关系，从而探讨污泥流动性与污泥浓度的关系.

试验装置如图 2 所示，由一个直径 ϕ 为 0.1m、高 H 为 0.35m、容积 V 为 0.003 m^3 的透明有机玻璃圆桶组成，在靠近圆桶底部安装长度 l 为 0.2 m，直径不同(排出管半径 r 为 5、10、15、20 mm)的排出管. 该装置及其试验方法由 Spinosa 等 [13] 提出，已被证实试验过程重现性好，所得数据与用旋转式黏度计测得的数据有很好的一致性.

流变学试验：首先封闭排出管管口，将圆桶和底部的排出管装满污泥，保证没有气泡混入；然后将排出管管打开，让桶内污泥靠重力流出；至桶内污泥不能流出排出管为止，记录桶内滞留的污泥高度 h.

1.4 分析方法

总固体(TS)、悬浮固体(SS)、挥发性固体(VS)和挥发性悬浮固体(VSS)采用重量法，pH 值测定采用 Orion 868 pH 计，COD 采用重铬酸钾法，有机

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

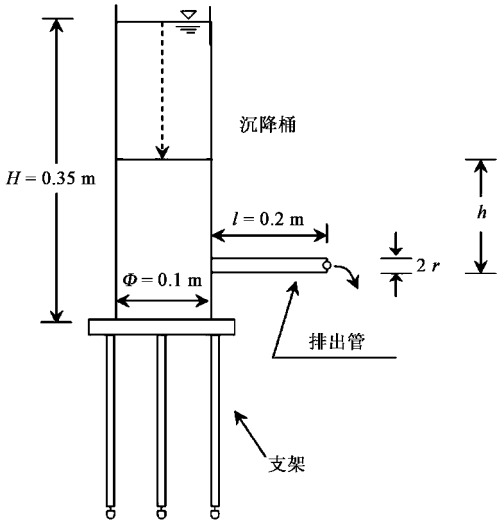

图 2　流变学试验装置

Fig. 2　Device of rheological test

酸(VFA)和甲烷含量采用 SQ-206 型气相色谱仪.

本研究中,VSS 溶解率定义为:(水解前 VSS - 水解后 VSS)/(水解前 VSS),SS 溶解率定义为:(水解前 SS - 水解后 SS)/(水解前 SS),COD 溶解率定义为:SCOD/水解前 TCOD.

2　结果与讨论

2.1　污泥热水解特性

2.1.1　固体物质的变化

污泥热水解过程中有机物包含两方面变化:首先是固体有机物的溶解,其次是部分溶解性的大分子有机物进行水解变成小分子物质[3].

SS 的变化可以反映污泥中固体物质的溶解规律. 图 3 为高固体污泥在 170℃条件下,不同含固率污泥的 SS 溶解率随热水解时间的变化趋势. 随着热水解时间的延长,SS 溶解率逐渐增大. 热水解时间为 0 ~ 30 min 时,SS 溶解率迅速增长,超过 30 min 后,增长趋于平缓. 热水解反应条件为 170℃,30 min 时,7%、9%、13% 的污泥 SS 溶解率分别是 43%、41%、38%. 不同浓度污泥热水解后 SS 溶解率变化趋势基本一致.

污泥中 VSS 占 VS 的 95% 以上,因此热水解过程中 VSS 的变化对于污泥性质的改变起着决定性作用[14]. VSS 在热水解过程中不断溶解和水解,VSS 溶解率随温度的变化趋势与 SS 一致. 热水解 170℃、30 min 条件下,7%、9%、13% 的污泥 VSS 溶解率分别是 47%、46.9%、43%(见图 4). 170℃条件下,热水解时间超过 30 min 后,不同浓度污泥

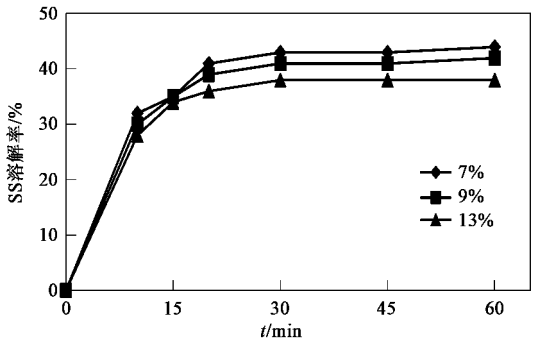

图 3　SS 溶解率的变化规律

Fig. 3　Variation of SS dissolving ratio

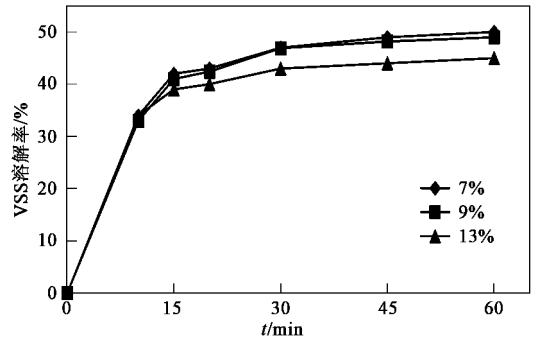

图 4　VSS 溶解率的变化规律

Fig. 4　Variation of VSS dissolving ratio

VSS 溶解率接近于 45%.

由图 3、图 4 可以看出,随着污泥固体浓度的升高,SS 和 VSS 溶解率减小,这可能是因为高固体污泥的传热传质性能不佳而引起的,但是不同固体浓度的污泥 SS 和 VSS 溶解率差别并不明显. 比较相同固体浓度和热水解时间条件下的 SS 溶解率和 VSS 溶解率可知,VSS 溶解率比对应的 SS 溶解率大,说明悬浮固体中有机悬浮物的溶解比无机悬浮物的溶解快,热水解对有机物的溶解效果更加显著.

2.1.2　COD 的溶解

随着污泥中有机物(蛋白质、碳水化合物及脂肪)的溶解和水解,固相中的有机物将转移至液相,SCOD(液相 COD)会增大,所以 COD 溶解率也可以反映污泥中有机物变化规律. 污泥中 COD 由固相至液相的水解克服了污泥厌氧消化的限速步骤,可以改善污泥的厌氧性能[1]. 图 5 为不同浓度的污泥 COD 溶解率随热水解时间的变化趋势.

COD 溶解率在开始的 15 min 内增加迅速,30 min 后变化平缓. 热水解条件为 170℃、30 min 时,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

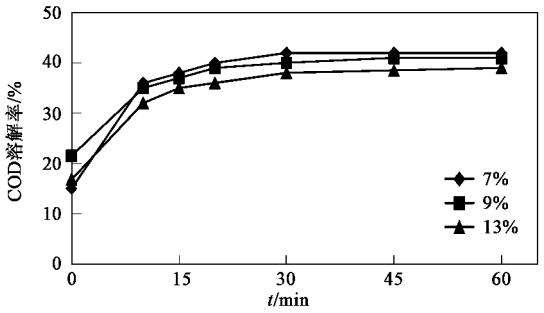

图 5 COD 溶解率的变化规律

Fig. 5 Variation of SCOD dissolving ratio

7%、9%、13% 的污泥 COD 溶解率分别为 42%、40%、36%. 热水解时间超过 30 min 后，各浓度的污泥 COD 溶解率都接近 40%，也高于用混合污泥热水解时 COD 的溶解率 25.7% [15]. 由于高固体污泥的传热传质效率下降，故随含固率的升高，COD 溶解率下降.

2.1.3 VFA 的变化

污泥中的固体有机物在热水解过程中不断溶解、液化，而溶解的有机物也同时不断水解：脂肪水解成甘油和脂肪酸，碳水化合物水解成小分子的多糖甚至单糖，蛋白质水解成多肽、二肽、氨基酸，氨基酸又进一步水解成低分子的有机酸、氨及二氧化碳 [16]. 污泥水解上清液含有丰富的 C1 ~ C5 混合的挥发性脂肪酸. 试验中考察了乙酸、丙酸、丁酸、戊酸的浓度变化，将其折算成相应的 COD 值，然后除以 SCOD 得到 VFA/SCOD，该值表征污泥液相中易生化降解物质的比例.

由图 6 可知 VFA/SCOD 的值为 13% ~ 25%. 热水解时间对 VFA/SCOD 的影响并不显著. 170℃ 条件下热水解 30 min 后，7%、9%、13% 的污泥 VFA/SCOD 值分别为 20.2%、19.4%、13.2%.

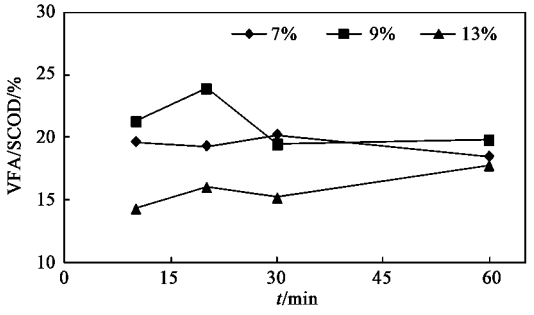

图 6 SCOD 中 VFA 所占的比例

Fig. 6 Proportion of VFA to SCOD

由图 7、图 8 可知，水解产物 VFA 中乙酸和丙酸占绝大部分，其中 30% 以上为乙酸. 乙酸随热水解时间的变化较平缓. 13% 的污泥热水解后乙酸浓度达到3 841 mg/L，占总 VFA 的 44%，7% 和 9% 的污泥乙酸占总 VFA 的比例也接近 40%. 易生化降解的低分子有机物的形成，使热水解处理过的污泥变得容易厌氧消化 [17].

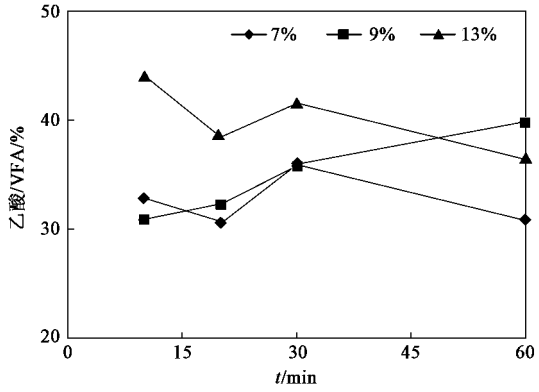

图 7 VFA 中乙酸所占的比例

Fig. 7 Proportion of acetic acid to VFA

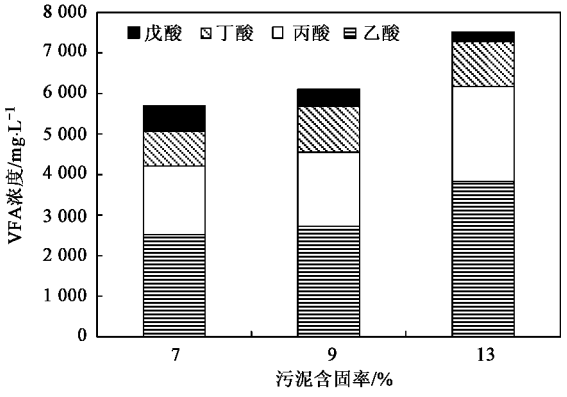

图 8 热水解 30 min 后污泥 VFA 的构成

Fig. 8 VFA constituent of thermally hydrolyzed sludge with 30 min

2.2 热水解污泥的厌氧消化特性

2.2.1 高固体污泥产气量变化

产气量大小和沼气产率是反映物料厌氧消化性能好坏的最重要指标 [18]. 沼气产率，即每投入单位有机物(以 VS 计)转化成的甲烷量. 产气量和气体中甲烷含量决定着可以回收的能量. 表 2 为未经过热处理的高固体污泥与在 170℃、30 min 条件下经热水解处理的高固体污泥进行 BMP 试验的产气结果.

由表 2 可见，热水解处理能增加污泥厌氧消化产气量. 相对于未经热水解处理的污泥，7%、9%、13% 的热水解污泥 BMP 产气量增幅分别达到

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

44%、27%、9%，沼气产率分别增加了63%、74%、37%. 由此可知热水解能显著改善污泥厌氧消化性能，并且随着污泥浓度的升高，对厌氧消化性能改善作用降低. 由表2还可知，9%的热水解污泥产气中的甲烷含量以及沼气的产率均高于7%、13%的污泥.

表2　热处理前后污泥的总产气量与沼气产率比较

Table 2　Total gas production and production ratio of methane

预处理方式	固体浓度/%	总产气量/mL	甲烷含量/%	沼气产率/mL·g^{-1}
经热水解处理	7	825	64.79	269.3
	9	772.5	71.60	284.2
	13	830	60.34	249.9
未经热水解处理	7	572.5	63.56	165.0
	9	607.5	64.23	163.6
	13	762.5	62.52	182.0

2.2.2　有机物去除率变化

以挥发性固体(VS)的去除率表征污泥中固体有机物的去除，是污泥厌氧消化中常用到的指标. 图9为7%、9%、13%的未经热水解处理和经热水解处理的污泥的VS去除率.

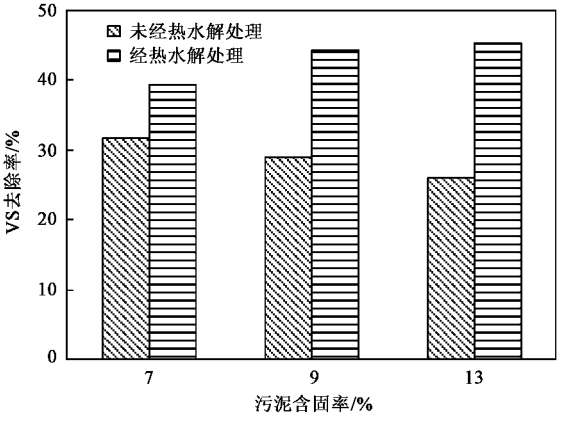

图9　热水解前后污泥VS去除率

Fig. 9　Removal ratio of VS before and after thermal hydrolysis

由图9可知，经过热水解处理后的高固体污泥VS去除率都高于对应浓度的未处理污泥，并且随着固体浓度的升高，VS去除率也逐渐升高. 13%的热水解污泥VS去除率达到45%. 在BMP试验时，同样体积的小瓶中保证了污泥的有机负荷和厌氧消化接种泥量是相同的前提下，则污泥浓度越高取样量越少，等同于厌氧活性污泥量增加了. 厌氧处理时，废水中的有机物主要是靠活性污泥中的微生物分解去除，故在一定范围内，活性污泥浓度愈高，厌氧消化的效率也愈高，这可能是VS去除率随污泥浓度变大而增高的原因.

2.3　污泥流变学规律

流变参数是污泥性质的一个重要指标，影响到污泥的处理、利用以及处置[13].

流变学是一种可以用来考察流体流动特征的手段，根据物料流动性，污泥可以划分为液体、浆状体和固体3种物理存在形式. 液体指污泥可以通过自身重力或在低的压力下流动，浆状体是在外力作用超过某一值时，污泥可以连续流动，在低于此值时表现出抗剪切能力，固体则表现出较高的抗剪切能力.

流体可以按照切变率 $d\mu/dy$ 与剪切应力 τ 的关系分为牛顿流体和非牛顿流体. 研究发现，污泥属非牛顿体的宾汉塑性体[9]，其流变关系符合式(1):

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{d\mu}{dy} \qquad (1)$$

式中，τ_B 为屈服应力，只有剪切力超过这一屈服应力时，流体才开始流动，η 为刚度系数，μ 为黏滞系数.

污泥流变参数的变化描述了污泥流体状态的变化. 污泥作为一种悬浮固体，其流变参数的变化与污泥含水率关系紧密. 当含水率降低时黏度 μ 增加，此时作为推动流体流动的关键参数屈服应力 τ_B 也相应增加. 当 τ_B 显著增加，表明此时污泥趋向塑性固体，失去流动性. 因此，通过污泥屈服应力的试验，探讨污泥由液体向塑性体转化的浓度范围.

根据流体的宾汉方程有式(2):

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu l} \times \left[1 - \left(\frac{4 \times 2\tau_0 \times l}{3 \times r \times \Delta p}\right)\right] \qquad (2)$$

式中，Q 为污泥的流量(m^3/s)，r 为排出管半径(m)，Δp 为重力压差(Pa)，τ_0 为屈服应力(Pa)，l 为排出管长度(m).

试验中，当浆体从管口的流出不再是连续的，认为此时 $Q = 0$，筒内截流的浆体的压力降 $\Delta p = \rho g h$，则流体的宾汉方程可简化为式(3):

$$\tau_0 = 3/8 \times \rho g h r / l \qquad (3)$$

式中，ρ 为污泥密度(kg/m^3)，g 为重力加速度常数(m/s^2)，h 为滞留污泥高度(m).

测定滞留污泥高度即可得到屈服应力. 污泥浓度与屈服应力的关系如图10.

由图10可以看出，随着固体浓度的不断提高，其屈服应力随之增大. 本试验中把污泥看作一种浆体，并且主要考虑固体浓度的影响. 固体浓度的增

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

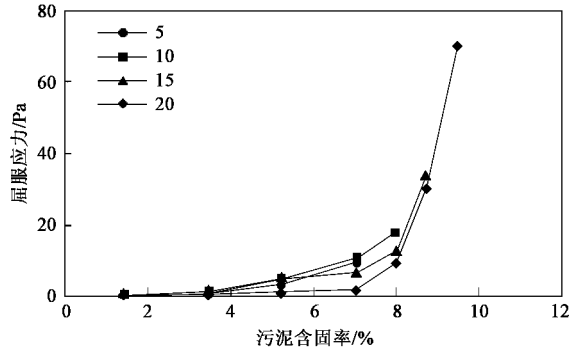

图 10 污泥含固率与屈服应力的关系

Fig. 10 Relation of sludge solid content and yield stress

大，意味着悬浮液中颗粒数目的增多，于是流体的流动受到更大的阻力，表现为流体黏滞性增加. 此外，随着悬浮固体颗粒浓度的增大，颗粒之间形成网状结构的趋势增强，从而限制了污泥悬浮体系的流动性，表现在屈服应力的增大[20].

污泥固体浓度 <9% 时，屈服应力增长缓慢，当固体浓度 <9% 时，屈服应力急剧增长. 屈服应力直接反映了浆体的流动性，故可推断在此浓度范围存在一个突变点，污泥的固体浓度大于此点，流动性急剧下降. 热水解试验过程中也发现，污泥固体浓度 >9% ~10% 时，污泥流动性迅速变差，工程中不利于输送，与屈服应力试验结果有很好的一致性。

考虑工程应用和节能的需求，选择污泥浓度 9% ~10% 的污泥浓度范围，作为高固体污泥的最佳热水解条件.

3 结论

(1) 随着热水解时间的延长，污泥中固体有机物的溶解率逐渐增高. 热水解 170℃、30 min 条件下，各浓度的高固体污泥 SS 溶解率都接近于 40%，VSS 溶解率接近于 45%，COD 溶解率接近 40%. 水解作用使污泥中 COD 由固相转移至液相，克服了污泥厌氧消化的限速步骤，改善了污泥的厌氧消化性能. 与低浓度的浓缩污泥相比，高固体污泥中固体物质的溶解并未因为污泥浓度的升高而受到太大影响.

(2) 经过热水解处理后，高固体污泥产气量增加较多，厌氧消化性能提高. 在 170℃ 条件下热水解 30 min 时，含固率为 7%、9%、13% 的污泥的 BMP 产气量增幅分别达到 44%、27%、9%，沼气产率分别增加了 63%、74%、37%. 9% 的污泥 BMP 产气中的甲烷含量以及沼气的产率均高于 7%、13% 的污泥.

(3) 经过热水解处理后的高固体污泥 VS 去除率高于相应含固率的未处理污泥，并且随着浓度的升高，VS 去除率也逐渐升高，13% 的污泥有机物去除率达到 45%.

(4) 污泥含固率 >9% 时，污泥屈服应力增长缓慢；含固率 >9% 时，屈服应力快速增长，污泥流动性急剧下降. 同时考虑工程应用和节能的需求，9% ~10% 的污泥含固率是高固体污泥热水解的最佳条件.

参考文献:

[1] Pavlostathis S G, Gosset J M. A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge [J]. Biotechnol Bioeng, 1986, **28** (10): 1519-1530.

[2] Qiao W, Wang W, Xun R, *et al*. Sewage sludge hydrothermal treatment by microwave irradiation combined with alkali addition [J]. J Mater Sci, 2008, **43**(7): 2431-2436.

[3] Haug R T, Stuckey D C, Gossett J M, *et al*. Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges [J]. Water Pollut Control Fed, 1978, **50** (1): 73-85.

[4] Brooks R B. Heat treatment of activated sludge [J]. Water Pollut Control, 1968, **67**(6):592-601.

[5] Neyens E, Baeyens J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability [J]. J Hazard Mater, 2003, **98**(1-3): 51-67.

[6] Brooks R B. Heat treatment of activated sludge [J]. Water Pollut Control, 1970, **69**(1): 92-99.

[7] Zheng J H, Graff R A, Fillos J, *et al*. Incorporation of rapid thermal conditioning into a wastewater treatment plant [J]. Fuel Proceess Technol, 1998, **56**(3): 183-200.

[8] Li Y Y, Noikeal T. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment [J]. Water Sci Technol, 1992, **26**(33): 857-866.

[9] Elbing G, Dünnebeil A. Thermischer zellaufschluß mit anschliebender faulung-laboruntersuchnngen (Thermal disintegration with subsequent digestion lab-scale investigation) [J]. Korrespondenz Abwasser, 1999, **46**(2): 538-547.

[10] Stuckey D C, McCarthy P L. The effect of thermal pretreatment on the anaerobic biodegradability and toxicity of waste activated sludge [J]. Water Res, 1984, **18**(11):1343-1353.

[11] 王治军，王伟. 热水解预处理改善污泥的厌氧消化性能 [J]. 环境科学，2005，**26**(1):68-71.

[12] 王晓燕. 城市污水处理污泥的综合利用初探 [J]. 宁夏石油化工，2004，(4):35-37.

[13] Spinosa L, Lotito V. A simple method for evaluating sludge yield stress [J]. Adv Environ Res, 2003, **7**(3): 655-659.

[14] 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.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[15] 乔玮,王伟,黎攀,等. 城市污水污泥微波热水解特性研究[J]. 环境科学,2008,29(1):152-157.

[16] Shanableh A, Joma S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment [J]. Water Sci Technol, 2001, 44(10): 129-135.

[17] Eskicioglu C, Kennedy K J, Droste R L. Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal pretreatment [J]. Water Res, 2006, 40(20): 3725-3736.

[18] Cui R, Jahng D. Enhanced methane production from anaerobic digestion of disintegrated and deproteinized excess sludge [J]. Biotechnol Lett, 2006, 28(8): 531-538.

[19] 王丽花,徐继润. 絮凝污泥悬浮液流变性质研究[J]. 流体机械,2007,35(6):1-4.

[20] 熊刚,费祥俊. 泥石流浆体屈服应力的计算方法[J]. 泥沙研究,1996,3(1):55-66.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www. hjkx. ac. cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1,1. 1,1. 1. 1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问. 对未刊稿件一般不退,请作者自留底稿.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn;网址:www. hjkx. ac. cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net