



## 第二代污泥厌氧处理工艺的开发

王凯军 王晓惠 吴冰  
北京市环境保护科学研究院

**摘要:** 本文对污泥处理中的有关的理论问题进行了探讨, 讨论了污泥、水解和液化以及污泥稳定性等概念。针对污泥处理的目的性, 首先从污泥稳定化程度评价指标入手研究, 对厌氧稳定性实验、污泥碱解实验和污泥液化等实验方法进行了深入的对比研究。提出液化实验这一简单可行的污泥稳定化(降解程度)指标的实验方法。

本文对根据我国城市污水处理发展的现状, 提出应该重视污水污泥厌氧处理新工艺开发和城市污水污泥厌氧处理工艺落后于厌氧污水处理工艺发展, 甚至落后于工业废水相关(污泥处理)领域发展的论断。通过对于厌氧处理工艺的综述研究, 认为污泥厌氧工艺开发, 应该将现有的相关成熟技术最大程度的集成和整合。研究集中突破整合过程中的技术难点和关键技术, 从而提出了多级厌氧处理工艺。本研究在理论分析和实验研究的基础上, 以城市污泥为对象进行了多级厌氧消化工艺的实验研究, 并在工程上进行验证。结果证实工艺是可行的, 可使污泥在较短的总停留时间( $T=7d$ )达到稳定化。

**关键词:** 污水污泥、稳定性、厌氧和水解

**Abstract:** In this paper theoretical problems related to sludge treatment has been discussed, first definition concept of sludge, hydrolysis and liquefaction as well as sludge stabilization has been given. According to the aims of sludge treatment, the index and evaluation methods of sludge stabilization have studied. The different sludge stabilization evaluation method, such as anaerobic stabilization assay, alkalinity hydrolysis assay and sludge liquefaction test have studied and compared. The relatively simple and feasible method, i.e. liquefaction test for evaluation of sludge stabilization (degradation degree) has been recommended.

**Key Word:** sewage sludge, stabilization, anaerobic and hydrolysis, liquefaction

### 一、概述

近年来, 在国家财力有限的情况下, 国家连续几年发行国债加大基础设施的投入。其中投入大量人力、物力和财力修建了城市污水处理厂, 在大量新建的城市污水处理厂中, 污泥处理问题应该得到足够的重视。在污泥处理技术中污泥厌氧消化的投资高, 污泥处理费用约占污水处理厂投资和运行费用的 20-40%, 并且污泥厌氧消化处理技术较复杂。在我国仅有的十几座污泥消化池中, 能够正常运行的为数不多, 有些池子根本就没有运行。所以, 这导致近年来国内在中小型(甚至大型)污水处理厂大多采用国外引进的延时曝气氧化沟、SBR 等工艺。延时曝气是一种低负荷工艺, 对于我国这样一个资源不足、人口众多的发展中国家, 是否适合推广这种低负荷的活性污泥工艺是值得推敲的问题。

首先, 低负荷的曝气池的池容和设备是中、高负荷活性污泥工艺的几倍, 相应的投资要高几倍; 其次, 延时曝气对污泥采用好氧稳定, 能耗比中、高负荷活性污泥工艺要高 40~50%左右, 延时曝气增加了能耗一方面带来了直接运行费的增加, 同时还要增加间接投资; 据资料报道目前每 kW 发电能力脱硫需要投资 1000 美元, 则每万吨延时曝气污水处理系统, 增加电耗所需的脱硫投资要 70 万元。如果按脱硫投资为电站投资 10%计, 则电厂增加投资为 700 万元, 这接近污水处理单位投资的 50%。从可持续发展角度讲, 大规模的采用延时曝气的低负荷工艺是不适合中国国情的。

所以, 对污泥的处理技术必须予以充分的重视, 能否解决好污泥问题是污水净化成功与否的决定性因素之一; 另外, 采用高效、低耗污水处理工艺的关键之一是解决城市污水厂污泥处理技术, 可以讲在今后我国城市污水工艺的技术进步, 在很大程度上取决于污泥处理和利用技术的进步。为了解决这一问题有必要加强污泥处理与利用的研究。



## 二、城市污水污泥的研究进展

### 1、两相消化理论

目前世界各国在污泥处理的领域仍以污泥厌氧消化工艺为主。厌氧消化工艺是在四、五十年代开发的成熟的污泥处理工艺。英国在 1977 年调查的 98 个城市污水处理厂中有 73 个建有污泥消化池。美国建有污泥消化池的污水处理厂总数为 4286 个。欧美各国多数污水处理厂都建有污泥消化池。这种工艺水力停留时间长,一般停留时间的设计标准是 20-30 天。为防止短路和加热,需设置搅拌和加温设备。

美国犹他大学Ghosh教授,从 70 年代开始了污泥二相消化研究,从微生物生长特点,生长动力学等方面从事了大量的研究,在基础研究的角度上,证明了二相工艺的优越性。但其采用的处理构筑物仍然为传统完全混合式的消化池,所以在停留时间,减少投资等方面没有取得突破性的进展。自从Ghosh等人提出二相消化工艺以来,国内外在这一领域进行了不少研究。我国广州能源所、成都生物所、清华大学等地均在有机废水和农业废弃物方面进行了大量的工作,上海市政设计院也对城市污水污泥的二相净化作了大量研究。

### 2、厌氧技术的发展

在 70 年代末期各种新型厌氧工艺得到发展,例如厌氧滤池(AF),上流式厌氧污泥床反应器(UASB)和厌氧流化床(FB)等。这些反应器的一个共同的特点是将固体停留时间与水力停留时间相分离,使固体停留时间长达上百天。这使厌氧处理高浓度污水的停留时间从过去的几天或几十天可以缩短到几小时或几天。美国的康万尔大学Jewell教授利用厌氧接触膜膨胀床(AFEFB)反应器处理含纤维素废水时发现,该反应器处理纤维素固体基质只需传统消化池 5%的池容即可达到相同的处理效果。北京环保所王凯军在改进的上流式污泥床(水解池)处理城市污水时,发现在水解池 2-3h的停留时间下,在处理污水的同时,被截留的污泥 50%以上得到了消化。因此,这一信息也许揭示了新的反应器在污泥处理上的巨大潜力,也是污泥处理工艺的发展方向。与污水厌氧处理领域的进展相比较,污泥厌氧领域的发展远远地落后于厌氧工艺本身的发展进程。对于城市污水污泥的处理,如何将厌氧工艺的成果应用到污泥处理领域是当前的主要课题。事实上,有理由认为从 70 年代后期研究者开发的各种新型的厌氧反应器,例如:UASB反应器、厌氧滤池、厌氧消化床等存在着巨大的开发潜力。其完全有可能成为处理污泥新型反应器或其组成单元之一。

### 3、相关领域的进展

事实上,对于城市污水污泥的处理,在厌氧技术迅速发展的今天,厌氧接触工艺已不是先进的工艺。在工业废水处理领域,近年来在高含悬浮物固体处理最为广泛的领域是酒精糟液的处理技术,南阳酒精厂 COD浓度为 25-30g/L,悬浮物浓度 35g/L, pH4.5-5.0。采用两个 5000m<sup>3</sup>/d的消化池并联运行,停留时间大约为 10d。相当于负荷 3.0kgCOD/m<sup>3</sup>.d,相当于悬浮物的负荷为 2.0-3.0kgSS/m<sup>3</sup>.d。需要说明的是在城市需气量较多时,酒精糟液不通过固液分离直接进入消化池,COD负荷为 5-6kgCOD/m<sup>3</sup>.d。厌氧消化COD、BOD<sub>5</sub>和SS处理效率分别为 75.6%、90.8% 和 45.5%。

污泥中温厌氧消化工艺的停留时间一般大于 20d.(在 20-30d的范围)。相当于悬浮物负荷为 1.0-1.5kgSS/m<sup>3</sup>.d, COD负荷最多为 2.0kgCOD/m<sup>3</sup>.d。从酒糟废液的处理能力和负荷而言,则大大高于城市污泥厌氧消化工艺。从这个意义上讲城市污水污泥的厌氧处理技术不但大大落后于厌氧处理技术的发展,而且还落后于厌氧工业废水处理技术的发展。

## 三、多级厌氧消化工艺

### 1、新工艺的构思

在对城市污水污泥特性和各种厌氧反应器了解的基础上,借鉴国内外的研究结果和带有共性的研究思路,新的城市污水污泥处理系统的思想是充分利用现有的成熟工艺的的优点,将现有的成熟技术最大程度的整合,集中突破技术整合过程中的技术难点和关键。并将治污、产气、综合利用三者相结合,使废物资源化、环境效益与经济效益和社会效益相统一。具体工艺的基本思想是分为如下三个处理阶段。

#### 1) 第一级处理阶段是液化和分离装置



第一级反应器应该具有将固体和液体状态的废弃物部分液化(水解和酸化)的功能。其中液化的污染物去 UASB 反应器(为第二级处理的一部分), 固体部分根据需要进行进一步消化或直接脱水处理。可采用加温完全混合式反应器(CSTR)作为酸化反应器, 采用 CSTR 反应器的优点是反应器采用完全混合式, 由于不产气可以采用不密封或不收集沼气的反应器。

## 2) 第二级处理阶段

第二级处理包括一个固液分离装置, 没有液化的固体部分可采用机械或上流式中间分离装置或设施。中间分离的主要功能是达到固液分离的目的, 保证出水中悬浮物含量少, 有机酸浓度高, 为后续的 UASB 厌氧处理提供有利的条件。分离后的固体可被进一步干化或堆肥并作为肥料或有机复合肥料的原料。

## 3) 第三级处理阶段

在第二阶段的固液分离装置应该去除大部分(80-90%)的悬浮物, 使得污泥转变为简单污水。城市污泥经 CSTR 反应器酸化后出水中含有高浓度 VFA, 需要具有高负荷去除率的反应器作为产甲烷反应器。UASB 反应器在处理进水稳定且悬浮物含量低的水有一定的优势, 而且 UASB 在世界范围内的应用相当广泛, 已有很多的运行经验。

## 2、实验流程

CSTR 反应器有效容积为 20L, 反应控制在恒温 and 搅拌的条件下。物料在 CSTR 反应器中进行水解、酸化反应, 反应器后接一上流式中间分离池(有效容积为 5L), 上流式中间分离池的作用是分离在 CSTR 反应器内产生的有机酸。采用 UASB 反应器出水回流洗脱方法。经液化后的水在 UASB 反应器内充分地降解, 产气经水封后由转子流量计测定产率, 水则排到排水槽内, 部分出水回流到中间分离池(图 1)。

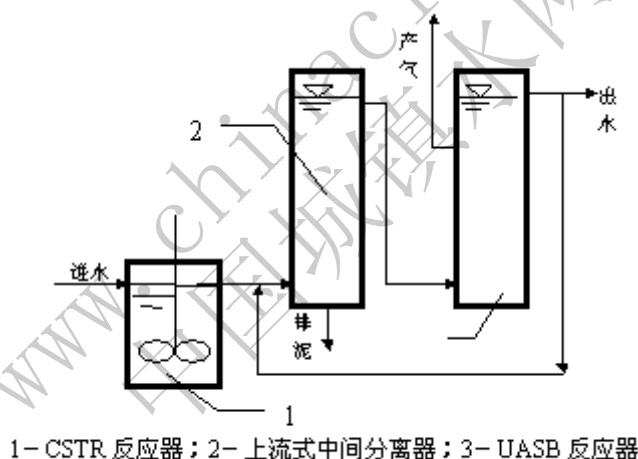


图 1 多级厌氧消化工艺流程图

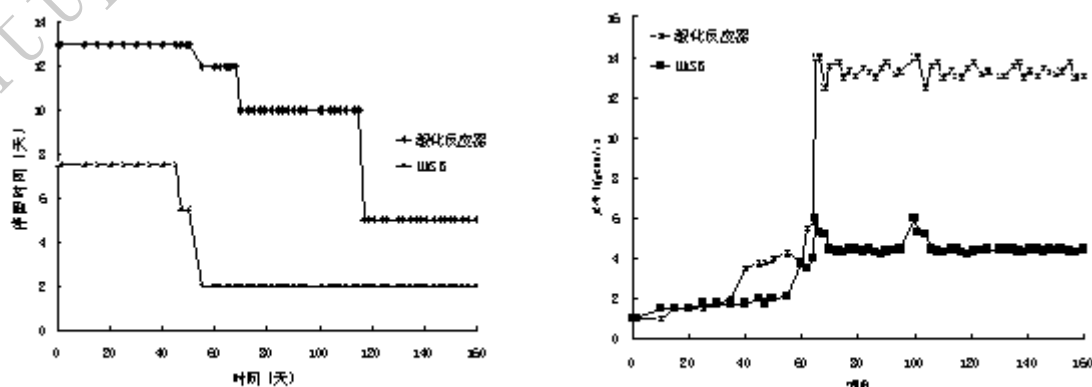


图 2 不同反应系统运行期间停留时间和负荷



实验采用分批投料,连续运行的方式,实验温度保持在中温 35℃。实验采用的污泥为高碑店污水处理厂的污水污泥,其污泥有机物含量较低VSS/TSS=45%。根据实验的进展逐步改变运行条件,提高负荷率和缩短停留时间,并考察反应器的运行情况。在稳定条件下重点考察两组实验条件,即: CSTR=10d,中间分离池=1d, UASB=1d; 另一组为: CSTR=5d,沉淀回流池=1d, UASB=1d。

### 3、结果与讨论

由于污泥消化过程污泥培养阶段耗时较长,在启动的初期的监测数据没有实际的意义。整个过程的各个反应器的停留时间和有机负荷的变化见图 2。从停留时间和有机负荷提高的情况来看,酸化池的有机负荷最终提高到 15kgCOD/m<sup>3</sup>.d。而UASB的负荷稳定在 5kgCOD/m<sup>3</sup>.d。

在整个运行运行期间,作为最终出水UASB反应器的COD和SS去除率和出水浓度与反应器的停留时间有着密切地联系(图 3a)。当总停留时间(T)为 7d时, COD的去除率在 85%左右, SS的去除率在 80~85%之间; 而当T=12d时, COD及SS去除率一直保持在 95%以上。

由图 3b可见, CSTR的HRT=5d时, COD<sub>d</sub>/COD<sub>t</sub>在 35~40%左右, 污泥液化效果明显; 而当HRT=10d时, 由于停留时间较长, COD<sub>d</sub>/COD<sub>t</sub>在 55%以上。说明停留时间对污泥的液化效果影响很大。实验开始测定了污泥样品溶解性COD<sub>d</sub>值, 进水COD<sub>d</sub>/COD<sub>t</sub>的比例为 8.1%左右。从上面讨论可见, 污泥在CSTR反应器中停留 10d时, 其进一步水解COD占总COD的 50%, 而当停留时间为 5d时, 水解COD的比例占总COD的 30%左右。对比污泥稳定性指标, 与厌氧消化工艺对比可知CSTR池停留时间HRT=5d, 经过水解的污泥就可以达到相当的稳定化。因此, 在以后的生产性实验中, 取CSTR反应器的HRT=5d。

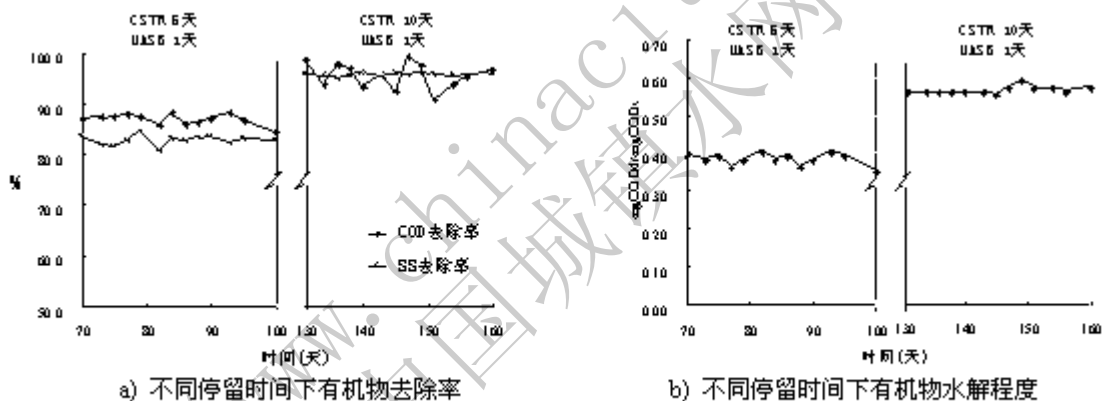


图3 UASB反应器在不同停留时间下的有机物去除率和降解程度

然而由图 4a 可见, VFA 上升比例相对不高。进水中 COD<sub>v</sub>/COD<sub>t</sub> 的比例在 7%左右; 经 5d 液化后, COD<sub>v</sub>/COD<sub>t</sub> 在 25%左右, 经 10d 液化, 比例降到在 20%以下。表明当 CSTR 反应器的停留时间延长, 发生甲烷化反应。在最终 UASB 反应器中, 厌氧主要在产甲烷阶段进行, COD<sub>v</sub>/COD<sub>d</sub> 回落至 5%左右。

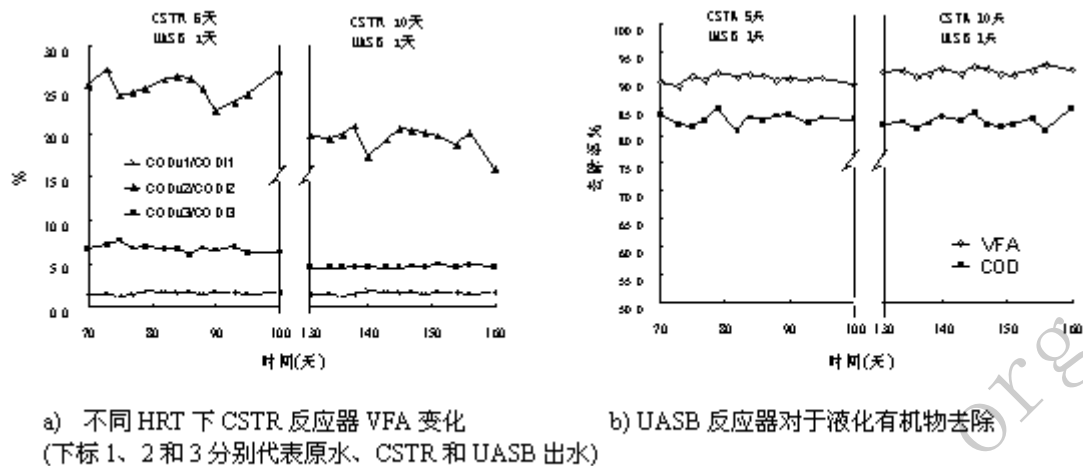


图 4 CSTR 和 UASB 反应器在不同停留时间对不同有机物的降解和去除

由图 4b 可见，虽然两组实验的停留时间和负荷各不相同，但从实验的结果来看 UASB 的去除效率却基本相同，VFA 的去除率为 90% 左右，对 COD 的去除率为 83% 左右。VFA 的去除效率较好，产酸相产生的挥发酸基本在反应器中得到降解。COD 的去除率不如 VFA，这是因为 UASB 进水中，除了 VFA 外，还有一部分不溶性 COD 尚未水解为可溶性 COD，这部分 COD 没有在反应器中得到去除。

### 5、新工艺的生产性应用

目前，工业废水和小型生活污水处理厂，普遍采用对好氧剩余污泥直接脱水的方法处理污泥。剩余活性污泥存在着耗药量大，脱水比较困难的缺点。北京市中日友好医院污水处理厂日处理水量为 2000m<sup>3</sup>/d，原污泥的处置方案为活性污泥经浓缩后，运至城市污水污水处理厂消纳，但在实际运行过程中经常出现由于污泥无稳定出路，而影响污水处理厂运转的情况。为了使活性污泥得到稳定的处置，实际工程中采用的一体化设备如图 5 所示，各反应器的停留时间分别为：

| 反应器     | 污泥酸化池 | 中间分离池 | UASB 反应器 |
|---------|-------|-------|----------|
| 停留时间(d) | 5     | 1     | 1        |

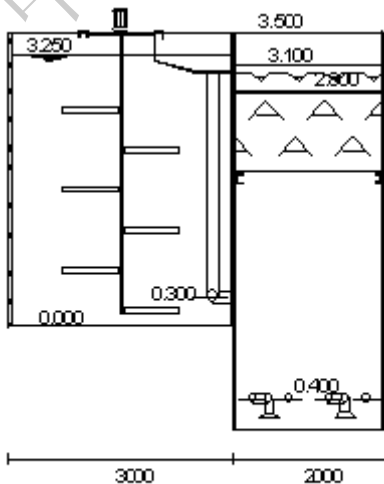


图 5 一体化污泥处理设备





二沉池排出的剩余污泥首先排入污泥酸化池进行水解酸化处理,然后进入中间分离池,该池排出的上清液进入 UASB 反应器,进行高浓度、低悬浮物有机废水的降解;从中间分离池排出的污泥经测定已基本稳定化,污泥量较常规处理减少了三分之二,脱水性能大大改善;而且病菌和虫卵杀灭率达到 99.99%,完全符合国家关于医院污水厂污水污泥无害化标准,从而彻底解决污泥消纳的问题。

#### 四、结论

本文根据我国城市污水处理发展的现状,提出应该重视污水污泥厌氧处理新工艺开发和城市污水污泥厌氧处理工艺落后于厌氧污水处理工艺发展,甚至落后于工业废水相关(污泥处理)领域发展的论断。通过对于厌氧处理工艺的综述研究,认为污泥厌氧工艺开发,应该将现有的相关成熟技术最大程度的集成和整合。研究集中突破整合过程中的技术难点和关键技术,从而提出了多级厌氧处理工艺。本研究在理论分析和实验研究的基础上,以城市污泥为对象进行了多级厌氧消化工艺的实验研究,并在工程上进行验证。结果证实工艺是可行的,可使污泥在较短的总停留时间( $T=7d$ )达到稳定化。

#### 参考文献

- 1) Sam Ghose(1991), Pilot-scale demonstration of two-phase anaerobic digestion of activated sludge. Wat. Sci. Tech. Vol.23, pp.1179-1188
- 2) Wang Kaijun(1994) Integrated Anaerobic and Aerobic Treatment of Sewage, Ph. D thesis, Wageningen Agricultural University, the Netherlands
- 3) Huang Ju-Chang, Bill T. Ray and Huang Yaojiang(1989), Accelerated Sludge Digestion by Anaerobic Fluidized Beds: Bench-scale Study, In: Proc. Int. Conf. Water and Wastewater, pp.628
- 4) 王凯军(1996), 城市污水厌氧处理工艺与其中污泥稳定化问题研究, 第四届海峡两岸环境研讨会, pp.21
- 5) 王凯军等(1998), 第二代污泥厌氧消化工艺研究, 北京市环境保护科学研究院, 研究报告
- 6) 吴冰(1997), 多级厌氧工艺处理含高悬浮固体废水, 北京矿业大学研究生院, 硕士论文
- 7) 申立贤(1983), 应用上流式厌氧污泥床反应器处理酒精、溶剂糟液, 北京市环境保护科学研究所, 研究报告