



污泥稳定化处理与资源化技术生产性研究

作者：赵丽君 李成江

简介： 污泥稳定化处理与资源化技术生产性研究，目的是开发高效低耗的城市污水处理厂污泥的减容化、稳定化、无害化、资源化技术，实现生物能的综合利用及有效回收。

关键字： 稳定化处理 资源化技术

1 概述

污泥稳定化处理与资源化技术生产性研究，目的是开发高效低耗的城市污水处理厂污泥的减容化、稳定化、无害化、资源化技术，实现生物能的综合利用及有效回收。主要内容有以下四个方面：

(1) 污泥厌氧消化是解决污泥稳定和污泥减容的最佳途径，通过提高消化池进泥浓度降低了消化池体积，减省了加热、搅拌消耗的能量，通过最佳运行参数的探索，提高了有机物去除率和产气率，实现了高效低耗的目标；

(2) 两相厌氧技术采用酸化和产甲烷段分开，高温酸化，中温产甲烷的技术路线，停留时间较常规厌氧消化减少 40%，其处理效果与常规厌氧相近，可以明显节省工程投资；

(3) 厌氧产生的沼气通过沼气利用系统可以最大限度回收利用生物能，实现污水厂部分能量自给，解决了沼气脱硫的技术关键，建成了沼气驱动鼓风机、余热回收、沼气锅炉污泥加热的整体系统，实现了沼气生物能的最大回收；

(4) 污泥无害化处理，解决了好氧高温发酵制肥料的静态装置和工艺技术，另外采用燃气红外线烘干污泥，可以有效杀灭虫卵，实现无害化。

以上几项技术基本实现了污泥高效减容、无害、沼气最大限度回收用于补充污水处理厂能量消耗的目标。消化污泥经高温堆肥或烘干可以满足卫生指示，在重金属不超标情况下，可安全用于农业，其公效明显，经济效益可观。实现了污水处理的良好生态循环。

2 污泥高效厌氧消化技术

生产性试验是通过对天津市东郊日处理 40 万吨的污水处理厂 1.0 立方米中温污泥消化

池进行的，结论意见为：

(1) 对该厂剩余活性污泥、一沉混合污泥、浓缩污泥、一级消化污泥、二级消化污泥、脱水污泥共计 42 个项目的化验分析，及对近几年东郊污水处理厂污泥化验数据的整理分析，其结果认为，天津市东郊污水处理厂污泥具有我国大城市污水污泥的典型性和代表性，它为低有机份、低脂肪、高碳水化合物污泥。具体指标为：浓缩污泥有机份年平均值为 53.57%，与欧美国家 70~80% 的有机份相比少得多。有机份中碳水化合物仅占 50%，脂肪占 10%，与欧美国家正好相反，这种低脂肪、高碳水化合物污泥属产气量少、沼气中甲烷含量低的污泥。

(2) 为了研究污泥厌氧消化过程中有机物的降解规律，平行进行了两组规模为 10 升/池的污泥中温 ($35\pm 2^{\circ}\text{C}$) 厌氧消化模拟小试。小试仍以天津市东郊污水处理厂浓缩池出泥为试验泥样，一次投泥，连续搅拌运行。运行 19 天时，有机分解率为 32.72% 已趋于稳定。通过对小试试验结果的分析，得出：

① 浓缩后污泥有机分解率在 32.72% 时，理论产沼气量为 $7.14\sim 8.42\text{m}^3\text{气}/\text{m}^3\text{泥}$ 。

② 在干泥中有机成分的比例为：

碳水化合物:脂肪:蛋白质= $4.8:1:3.7\sim 3.9$

理论上分解 1 克有机物产沼气量为 $825\text{ mL}/\text{gvss}$ 左右；

③ 经试验分析，各有机物的产气量为：

碳水化合物产 44~48%

脂肪产 21~23%

蛋白质产 30~33%；

(3) 以天津市东郊污水处理厂 2# 消化池及其相应的设备、装置、仪表为试验设施，以浓缩池出泥为试验用泥样，在保持泥含水率、pH 值、酸碱度、碳氮比、重金属等原有特性的情况下，按照污泥消化温度、污泥投配率、沼气搅拌间隔、投泥间隔的不同，做了 4 组生产性试验。通过试验结果的分析及近几年来实际运行状况的总结，得出东郊污水处理厂污泥中温消化稳定运行的最佳工艺参数为：

pH 值： $6.5\sim 7.5$ ；

含水率： $94.8\sim 96.5\%$ ；

消化温度： $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；



消化时间：不低于 16.7 天；

搅拌：连续沼气搅拌，搅拌强度 $1 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{h}$ ；

有机投配负荷： $0.7 \sim 1.7 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{d})$ 。

(4) 搅拌方式是影响产气率的重要因素，为此，以正在运行中的消化池为实验模型，进行了大型的示踪剂动态和静态的生产试验。在研究中参考化学工程理论，应用 Levenspiel 化学工程反应器混合模型，推导了污泥消化池污泥混合效果的数学表达式：

$$\ln(C / C_0) = t / \tau + \ln[(v_1 V / V_2) / \tau]$$

经数据分析得出：

当投泥量为 $600 \text{ m}^3 / \text{d}$ 时，该消化池的平均水力停留时间约为 12 天，池内死容积约占总容积的 28%，池内短流率占活区总流率的 39%。

这样的试验结果与国外运行比较好的消化池大体相当，进而说明，东郊污水处理厂消化池采用的管束式沼气搅拌方式搅拌效果比较理想，能够在池内大部分区域达到均匀搅拌。

(5) 降低消化池进泥的含水率是降低运行成本，提高产气率的关键。为此本课题组对东郊污水处理厂的剩余活性污泥、混合污泥、初沉生污泥进行了重力浓缩试验，并对剩余活性污泥进行了气浮浓缩试验。通过污泥的浓缩试验和生产实际的考察，剩余活性污泥重力浓缩和气浮浓缩均取得了较好的小试效果。但是剩余污泥与初沉污泥分别进行单独浓缩，不但要增加处理设施，而且初沉污泥流动性差，易堵塞，也不宜单独处理。而将剩余活性污泥回流到初沉池，不但可提高初沉池的处理效率，使初沉池底流含水率提高到 98%，具有较好的流动性，不易堵塞，浓缩池的底流含水率也达到 95%，达到了污泥消化所需要的含水率。

(6) 污泥厌氧消化的进泥浓度由 $30 \text{ g} / \text{L}$ 提高到 $50 \text{ g} / \text{L}$ ，可以减少消化池约 40% 的体积。采用剩余污泥回流至一沉池，由一沉池排泥至浓缩池的运行方式，合理设置浓缩时间，浓缩池排泥浓度可达 $50 \text{ g} / \text{L}$ ，可省去一般机械浓缩方法简便，经济实用；获得了消化池运行的最佳工况，在最佳工艺条件下，消化池运行的效率参数为：

产气率： $5.87 \sim 8.36 \text{ m}^3 \text{ 气} / \text{m}^3 \text{ 泥}$ ；

分解单位重量有机物产气量： $0.734 \sim 0.762 \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot \text{vss}$ ，与理论产沼气量 $0.825 \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot \text{vss}$ 相比，达到了理论产沼气量的 88.97~92.36%；

有机分解率： 37.37~41.09%；

沼气组成：甲烷含量达 70.34~72.73%。

其结果达到了合同规定的“在不增加基建投资和运行费用”情况下，达到理论产沼量的80%”的要求。

(7) 对重金属影响的评价

① 浓缩污泥中各种重金属的含量基本上还没有达到对厌氧消化产生抑制作用的浓度。

② 消化后的污泥与农用污泥污染物控制标准比较，重金属中，除铅（Pb）以外，都严重超标，镍的含量与标准值非常接近，脱水后不适于采用堆肥处理。

3 污泥两相厌氧消化技术的生产性研究

将“八五”国家科技攻关中试成果应用于上海石化水质净化厂的消化池的改建工作中，在生产性装置上重点研究污泥两相（高温酸化+中温甲烷化）厌氧消化工艺和消化池污泥射流搅拌技术，获得优化工艺及运行参数。

① 将原有的二级消化改造成加热（高温酸化）和一级消化（中温甲烷化、污泥射流搅拌或泵循环搅拌），而二级消化以沉淀分离为主。

② 采用污泥两相厌氧消化工艺（高温 55℃酸化+中温 35℃甲烷化），在平行的运行条件下，分析比较了污泥射流沼气搅拌和普通的泵循环搅拌对污泥消化系统处理效果的影响。

搅拌方式的影响：污泥射流沼气搅拌较泵循环搅拌：VS 去除率提高 10~19.4%，产气率提高 15.6~17.3%，COD 去除率也有不同程度的提高。

搅拌强度（时间）对消化效果及产气率的影响：试验确定了最佳搅拌强度，在此工况下 VS 去除率可达 36.6%，产气率 0.553m³ / kgVS 去除，采用泵循环 VS 去除率 31.4%，产气率 0.538m³ / kgVS 去除。

运行稳定性比较：污泥射流沼气搅拌时，加强了沼气泡的聚并，上升和向空中释放，使酸性气体 CO₂ 少留存于消化液中，使系统运行稳定性更强。

4 污泥生物能综合利用技术

借鉴国内外同类工程的经验，对青岛海泊河污水处理厂的沼气脱硫系统、沼气储罐、消化池进行了技术改造，为测定生物能综合利用系统的运行参数，在生物能综合利用系统安装了部分仪表，购置了专用测试仪器。对生物能综合利用系统进行了检修，更换了沼气鼓风机



的关键部件，为试验测试奠定了坚实可靠的基础。进行了二年多的测试工作。为生物能综合利用系统的综合分析提供了大量宝贵的测试数据。其结论为：

(1) 沼气组分对利用系统的影响

研究证明进水中有机物种类的比例是决定沼气含量的主要因素，同时与有机物去除率有关。沼气是一种混合气体，同时还含有水份、悬浮物，在应用之前需对沼气进行净化，去除水份、悬浮物、 H_2S 、并在系统中设置储气柜、火炬、燃烧速率是评价沼气质量的重要指标，此值决定于利用系统的效率。

(2) 沼气脱硫系统

采用干式脱硫系统，研究了温度、湿度、沼气结露、压力损失、硫容、空速对脱硫的影响，其结果为：

沼气进脱硫塔前，必须脱除其中的液态水，防止液态水在塔内积累。

温度对脱硫的影响显著，沼气氧化铁干法脱硫的运行温度在 $28\sim 40^{\circ}C$ 之间最佳。

使脱硫塔内沼气含水率为饱和含水率的 80%，可提高脱硫效果。

沼气脱硫塔压降与沼气流量呈线性关系，且随运行时间的持续而增加。

当脱硫塔进口沼气 $[H_2S]=10\sim 20\text{mdL}$ ，空速为 20h^{-1} ，可将 $[H_2S]$ 去除到 0.2mg/L ；空速为 30h^{-1} ，可将 $[H_2S]$ 去除到 $0.2\sim 0.61\text{mg/L}$ ，空速为 60h^{-1} ，可将 $[H_2S]$ 去除到 $1\sim 5\text{mg/L}$ 。

本次试验结束时，脱硫剂硫容可达 30%。

(3) 沼气锅炉热能平衡

通过对锅炉进出水温度、流量和消耗的沼气体积进行测试，其热效率为：

以沼气为燃料，沼气锅炉的热效率为 $50\sim 90\%$ ；

额定燃气量为 $400\text{m}^3/\text{h}$ 的沼气锅炉：当燃沼气体积小于 $300\text{m}^3/\text{h}$ 时，沼气锅炉的热效率为 $50\sim 80\%$ ；当燃沼气体积大于 $300\text{m}^3/\text{h}$ 时，沼气锅炉的热效率为 $80\sim 90\%$ ；

沼气锅炉出水温度在 $40\sim 55^{\circ}C$ 。

(4) 沼气驱动鼓风机系统热能平衡

沼气驱动鼓风机是生物能利用系统的核心，为使沼气最大限度被利用，沼气驱动鼓风机设有冷却水回收和烟气回收装置，回收余热用于消化池污泥加热，使沼气热能利用率大于 70%。

通过青岛海泊河污水处理厂沼气发动机驱动鼓风机组运转的测试结果表明,在污水处理厂处理污水的同时,对所获得的副产品——沼气进行广泛的研究利用是大势所趋,就可做为污水处理电耗的补充,降低的运行、管理费用。

海泊河污水厂沼气发动机每台沼气象用量为 134 m³ / h, 综合热效率 85.1%, 其中发动机热能利用率 28.9%, 冷却水吸收能量占 36.1%, 废气热回收率 20.1%。按每套机组正常连续运行, 可回收电量 2146×10³ kWh / a, 回收费用约 107 万元 / a。利用余热提高污泥温度可节省耗煤量 4236 t / a, 并可向曝气池内供应氧气 2203 m³ / h。

沼气发动机系统的余热要充分利用, 首先要使整个系统形成闭路运行。就是从废气热交换器的出水热量与消化污泥的需热量达到平衡, 在夏季可不采取再加热就可去消化段加热污泥; 在出现故障或冬季时, 可采用煤锅炉或沼气锅炉提高水温, 这才能有效地利用热源, 使之体现了经济性和合理性。

(5) 污泥生物能综合利用探索出了影响脱硫效果的几个因素, 合理控制这些因素可以提高脱硫效果, 获得了沼气利用系统的热平衡参数, 为正确指导工程设计和污水厂运行提供了科学依据。热回收价值分析见表 1、表 2。

表 1 回收价值分析

沼气热值	21509 KJ / Nm ³
发动机用气量	134 m ³ / h
沼气象热量	3054278 KJ / h
机械转换率	28.9%
热能消耗	617211.4 KJ / h
折合电量	245 kWh / h×24h=5880 kWh / d

年累计节电	5880 kWh / d×365d=2146×103 kWh / a
电费	0.5 元 kWh
合计价值	0.5 元 kWh×2146×103 kWh=107.31 万元 / 年

表 2 污泥干化前后植物养分含量（%）

循环水量	29.3 m3 / h
水温变化范围	42～56℃（14℃）
水获热量	29.3 m3 / h×1000 kg×4.1868 KJ / kg·℃×14℃=1717425 KJ / h
燃煤种类	烟煤
燃煤热值	5000 KJ / kg
燃烧效率	70%，热值 5000 KJ / kg×70%=3500 KJ / kg
折合煤耗	1717425 KJ / h / 3500 KJ / kg=490 kg / h
月计节煤量	0.49 T / h×24×30=353 T / 月
年计节煤量	353 T / 月×12=4236 T / 年
燃煤价格	200 元 / T
月回收价值	7.766 万元
年回收价值	93.192 万元

5 污泥颗粒肥高温干燥技术



脱水后污泥经过污泥颗粒成型机成形，用燃气窑炉烘干，使污泥含水率 10%左右，烘干时间约 30 分钟，可以杀灭绝大部分蛔虫卵、大肠杆菌、无害化处置周期比好氧堆肥技术缩短几十倍，完全满足考核指标缩短 10%~20%的要求。

污泥经燃气红外干化炉窑干处理后，得到的污泥产品具有如下特点：

(1) 氮、磷、钾的含量没有减少，有机物含量与干化前相比也没有什么变化，污泥产品在干化后完全达到保持原来肥效的目的；

(2) 污泥中大肠杆菌、蛔虫卵已完全杀死，霉菌等微生物总量也得到了控制，说明污泥产品已达到了卫生上无害化、稳定化的目的；

(3) 污泥在干化前后，重金属含量没有发生变化，对重金属含量较低的城市污水厂污泥而言，污泥产品可用于农田作物及园林绿化；

(4) 污泥产品便于运输、贮存、便于生产上使用。

6 利用城市污泥生产有机复合

6.1 污泥的高效综合农业利用

以海泊河污水处理厂的消化后污泥，晒干后经配方称料混匀后，采用圆鼓滚动和圆盘造粒法制作复混肥，该方法的粘结机理是依赖强压下的化学键和范德华引力，使物料升值，在陈化冷却过程中散发一些水分，然后进行包装，应用此有机复合肥分别进行了有机污染和病原物传播、重金属污泥土壤的研究，对多种农作物的能效试验，重金属以作物果实的污染指数等试验研究，获得了大量的技术数据，为全面评价污泥的肥份及副作用提供了科学数据。为污泥的农业利用提供了依据。

(1) 污泥中重金属对农用的影响

污泥中含有的重金属（锌、铜、镍、铬、镉、汞、铅、砷）锌含量约 3000mg / kg 干污泥，超过国家农用污泥控制标准（GB4284—84），其余各重金属元素的含量均在国标要求范围内。

污泥中的重金属主要以可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、硫化物及有机结合态和残渣态五中形态存在。其中，前三种为不稳定态，后两种为稳定态。污泥中锌和镍主要以不稳定态的形式（锌的不稳定态含量约 74%、镍约 71%）存在，铜主要以硫化物及有

机结合态存在（约 70%），汞、镉、砷、铬、铅等毒性大的金属元素主要以残渣存在。重金属的这种分布特征对污泥农用比较有利。

S²⁻离子对重金属的稳定有一定作用。向污泥中投加 SO₄²⁻，能促进不稳定态的重金属的消化过程中向稳定的硫化物的转化，从而提高其稳定性，稳定率分别提高到锌：39%（可交换离子态降低了 75%）、铜：100%、镍：33%、铬：70%、汞：100%、铅：100%、砷：100%。

60 天的淋溶试验表明：该厂污泥中重金属的返溶率很低，淋溶出水中重金属浓度远低于国家固体废物污染控制标准（GB5085—85）。因此，土地施用不会造成重金属污染。

一般作物为施污泥混肥 100 kg，随施肥进入土壤的污泥只有 50 kg 左右，仅占耕层土重的 0.03%，在本污泥重金属元素含量就不超标的情况下，施工用量又很小，土壤不会因此而受污染。对小麦和甘兰施用污泥复混肥土壤的测定结果表明，二种作物、土壤 8 种重金属元素含量不仅没有超标，而且单项污染指数和综合污染指数都远小于污染起始值 1，与施用鸡粪复混肥和对照区的土壤污染指数几乎无差异。

(2) 污泥肥效

污泥中有机质含量为 48~60%，氮、磷、钾三要素含量为 33%、15%、0.46%。是一种很好的农肥资源，通过对 6 种作物的栽培试验，不同作物施用污泥复混肥都有明显的增产作用，其效果大，小顺序为：大白菜（31.9%）>玉米（25.5%）>花生（23.4%）>小麦（16.7%）>甘兰（13.1%）>辣椒（9.4%）；从 3 种不同复混肥的增产效果来看，污泥复混肥优于无机复混肥，玉米、花生、小麦和大白菜 4 种作物平均增产 5.3%，增幅 1.5%~7.8%，与鸡粪复混肥的增产效果互有高低，二者基本持平。

采用燃气红外窑烘干污泥具有投资省，卫生指标好，经过改进后便于在污水厂推广使用，污泥干化前后植物养分与病原体及微生物总量对照，见表 3、表 4。

表 3 污泥干化前后植物养分含量（%）

类别	N	P（P ₂ O ₅ ）	K（K ₂ O）	有机物
风干泥	1.33	5.60	0.058	63.7

干化泥	1.44	6.36	0.057	63.1
-----	------	------	-------	------

表 4 污泥干化前后病原体及微生物总量

污 泥 种 类	大 肠 杆 菌	蛔 虫 卵	细菌(cfu/g 干泥)	放 线 菌 (cfu / g 干泥)	霉菌（cfu / g 干泥）
脱水进泥（湿泥）	1.22×106	281	2.44×109	2.0×104	2.06×105
干化炉窑出泥(干化炉温200～250℃)	0	0	190	20	230

6.2 利用城市污泥生产有机复合肥

将深圳市某污水处理厂的脱水污泥与干污泥及树叶粉等按一定比例充分混匀，保持混合物料水分含量在 50%～65%，C / N 为 15～30：1，装入直径 1.6m，高度 1.5m 的发酵桶，将发酵桶放入长 36m，宽 1.7m 发酵槽中，发酵槽侧墙高 2m，发酵槽中铺设供发酵桶滚动铁轨，发酵槽四周密封，顶部有防雨工棚，沿发酵槽侧壁有臭气收集管道，将发酵过程中产生的臭气收集排放，利用发酵桶的自重，使其在坡度 3～5°的铁轨上缓慢滚动，每天滚动一周，从而达到物料的翻动通气，该发酵周期 5～6 天，温度可上升至 50℃以上 2～3 天，然后将物料转入二次发酵池。采用强制通气发酵，该过程约 2～3 周。可得腐熟堆肥。该堆肥水分含量小于 50%，臭味减少。病原和寄生虫（卵）大部分被杀灭。或将上述比例的污泥混合物装入长 10m，宽 2.0m，高 1.5m 强制通气发酵池中，发酵池底部有两条 30cm 宽，15cm 深，相距 50cm 的强制通风道，采用鼓风机间歇式强制通气，通风量控制在 6～12m3（空气 / m3（混合物）·h，堆体温度在 55℃以上可保持 5～7 天，一次发酵过程约 2 周。其中间翻垛一次，然后将物料转入二次发酵池进行后熟发酵，通气量增加到 10～20 m3（空气 / m3（混合物）·h，持续约 2～3 周，即可得腐熟堆肥。该腐熟堆肥无臭味，病原和寄生虫（卵）被杀灭，不招惹蚊蝇等，水分含量减少（小于 45%）适于土地利用，综合分析表明，强制通气静态垛发酵工艺比滚桶发酵工艺经济、可靠，且维持费用较低。

根据土壤养分状况和植物对养分的需求，将污泥堆肥烘干、粉碎然后给其中添加适量的



化学肥料（尿素、氯化钾、硫酸钾等）制成颗粒状有机复合肥，或给其中加入一定量的有益微生物（固氮菌、解磷、解钾菌等）制成生物型的有机复合肥料，该肥料产品符合广东省有机复合肥料地方标准（DB44 / 84—1966）和企业标准（Q / WL001—2000），产品试销表明，对水稻、蔬菜、果树等增产明显。市场前景良好。

研究达到了国际先进水平，申请了专利，建立了生产线，产品已形成规模化生产。

中国城镇水网
www.chinacitywater.org