

污泥处理处置技术创新现状、趋势和挑战

文 / 戴晓虎

(同济大学环境科学与工程学院院长

国家城市污染控制工程研究中心主任

国家 863 计划资源环境领域专家, 污染控制课题组组长)

一、污泥的来源和组成

1、污泥的来源

污泥是污水处理厂的污水在脱水后的副产物, 污泥主要有三种类型: 初沉污泥、生物污泥和混合污泥。初沉污泥主要是原污水中未降解的固体物质; 生物污泥主要是微生物与原污水中未降解的固体物质; 混合污泥是初沉污泥与生物污泥的结合。

2、污泥的性质

污水处理厂剩余污泥量的多少可根据有无设置初沉池进行计算: 如果污水处理厂没有设置初沉池, 生物处理污泥主要是微生物与原污水中部分固体物质, 其剩余污泥量的计算公式为: $\Delta X = YQ(S_0 - S_e) - k_d VX_v + (SS_0 - SS_e) * fQ$ 。如果污水处理厂设有初沉池, 则初沉池对 SS 的去除率约为 40%-60%, 即假设进水 SS=200mg/L, 则原水中约有 80-120mg/L 的固体物质转化为初沉污泥。其中:

ΔX ——剩余污泥量 kgSS/d;

V——生物反应池容积 (m^3);

X——生物反应池内混合液悬浮固体平均浓度 g MLSS/L;

Y——污泥产率 (kgVSS/kg BOD₅), 20°C 时为 0.4-0.8;

S₀——生物反应池进水五日生化需氧量 (kg/m³);

S_e——生物反应池出水五日生化需氧量 (kg/m³);

K_d——衰减系数 (d⁻¹);

F——SS 的污泥转换率, 宜根据试验资料确定, 无试验资料, 可取 0.5-0.7gMLSS/gSS。该系数根据各国污泥性质的不同而不同, 德国为 0.6 左右, 法国为 0.4 左右, 美国为 0.4-0.6, 即生物污泥含有的原污水固体物质约占

30%–50%，约合原水 COD 的 40%；混合污泥含有的原污水固体物质约占 50%–70%，约合进水 COD 的 50%。

由此可见，虽然我国在“十一五”期间，污水处理厂完成了 900 万吨 COD 减排的工作任务，但是对剩余污泥却没有进行任何处理，如果将这些未经处理的污泥擅自堆放，污泥中将有 30%左右的 COD 会通过各种途径再回到环境中去，严重影响我国节能减排的工作进展，因此污泥的处理处置非常重要。

二、污泥处理处置原则

很多人都认为污泥是一个微生物的群体，是污水处理后的产物，其实并不尽然。其实污泥中含有的人畜粪便、餐厨垃圾等都属于非稳定物质，不能通过简易的脱水处理后就随意丢弃。目前，污泥处理处置的目标主要是稳定化、减量化、无害化和资源化。污泥通过减量化、稳定化、无害化可以避免污泥的二次污染，通过资源化可以进一步实现对污泥中富含的有机质、氮、磷、钾等营养元素的资源利用。

1、稳定化：是指将污泥中的腐臭物质及容易造成二次污染的物质去除。

2、减量化：该处置原则有两层含义：一是将污泥中的水分去除，二是通过好氧或厌氧等手段将污泥中的有机物去除，但在我国对污泥的减量化最多只做到污泥“减容化”。

3、无害化：是指根据各国的法律规定，对污泥的处理处置过程中和污泥的最终利用中，不能造成环境危害。

4、资源化：这是世界各国对污泥处理处置重点的研究课题，被列入“城市矿产”的范畴。

5、低碳化：随着地球环境变暖，国际上将对温室气体的排放进行评估，对污泥的处理处置也将考虑温室气体排放的因素。

目前我国污水处理厂的污泥处理设施基本实现了污泥减容，但由于污泥最终处置技术路线不明确、投资和运行资金不到位、法规监管体系不完善等原因，污泥处理处置还没有真正实现稳定化、无害化、资源化，存在着严重的二次污染风险。

三、现有的技术手段

1、污泥减量化的技术手段

（1）污泥浓缩

常用的有带式浓缩机、滚筒式浓缩机、筒式螺旋浓缩机及离心机等。技术路线和设备性能已和国际接轨，由于我国污泥的性质特点，与国外污水处理厂相比，在浓缩效率及加药量方面还存在一定的差异。

（2）污泥脱水

常用的污泥脱水设备有带式脱水机、筒式螺旋脱水机、离心机和板框脱水机、浓缩脱水一体机等。技术路线和设备已和国际接轨，由于我国污泥的特性以及污泥没有得到稳定化处理的现状，与国外污水处理厂相比，在脱水效率和加药量方面还存在一定的差异。

针对我国目前污泥处置以填埋方式为主的需求，国内近年来开发了多种高干度污泥脱水/固化系统，并已得到了工程化应用。

（3）污泥干化

近年来污泥干化系统设备的国产化发展很快，但目前大型化投产的干化项目如北京、上海、重庆、深圳、苏州等地均采用进口设备。污泥单独干化焚烧工程案例不多，主要有国外进口的流化床工艺（如上海石洞口污水处理厂）以及国内自主开发的污泥喷雾干化焚烧（如浙江绍兴和萧山）。

2、污泥稳定化的技术手段

（1）生物方法

主要包括厌氧消化和好氧稳定方法。

（2）化学方法

化学方法是需要在污泥中投加石灰，但是从专业的角度来看，投加石灰只能起到杀菌消毒的作用，只是对污泥中部分病原菌处理实现了稳定化，但要做到真正意义上的污泥稳定化（即将容易分解的有机物去除），这种方法的效果还十分有限，在德国，投加石灰只是在上世纪40-50年代作为一种应急处理的手段，此外，还有将污泥加热到70℃进行杀菌的热处理技术，也具有一定的稳定化功能，但都不是长远稳定化处理污泥的方法。

3、污泥无害化的技术手段

主要有污泥稳定化技术+热化学处理，即使污泥在处理处置过程中，包括污泥的最终堆放，都达到不对环境产生二次污染的目的。

4、污泥资源化的技术手段

(1) 回收能源：主要有厌氧消化技术、热化学焚烧技术、热解技术、碳化技术等。

(2) 回收有机质：主要有厌氧消化技术、好氧稳定技术及土地利用。如果从循环经济角度来看，污泥若没有重金属成分，回用土地是最好的处置手段，美国每年大约有60%的污泥，英国、法国每年大约有40%-50%的污泥回用到土地。

(3) 回收磷资源：主要有磷回收（MAP技术）及土地利用。由于磷资源的短缺，据估计，在未来的100-300年间，全球的磷矿资源将面临枯竭，而人类所吃的食物中含有丰富的磷，除了身体必需外，均随着粪便进入到污水处理厂。经检测，我国污水处理厂的进水磷含量约为6-10mg/L，如果这部分磷能够回用到土地中去，我国的粮食种植将大幅度减少磷肥的使用量。

因此，从上世纪90年代开始，欧盟就在这方面进行了大量的研究投入，现在正等待磷的价格上升到合理的价位。德国则在考虑把污泥堆放到闲置的矿井内，等到需要磷的时候，再把污泥拿出来作二次处理。而在我国，等磷的价格到了一定的价位，国家会从战略上有所考量，磷的回收也会成为污泥资源化利用的一个选择。

(4) 回收有机酸补充污水处理厂碳源

四、几种污泥处理处置新技术的介绍

1、污泥高含固厌氧消化技术

污泥高含固厌氧消化技术是国内外研究的热点，通过污泥的厌氧消化技术回收沼气能源，但是目前遇到的技术瓶颈是如何通过现有技术提高厌氧消化的效率，其中有一种方法即提高污泥的含固率。传统的厌氧消化技术的含固率仅3%-5%，效率低；高效厌氧消化技术的含固率大于10%，效率提高一倍。污泥高含固厌氧消化与传统消化系统的比较见表1。高含固厌氧消化是未来污泥处理的一个方向，我国正在积极进行这方面的探索，努力提高污泥厌氧消化后的含固率与产气比，如大连夏家河污泥处理项目、宁波宁海污泥处理项目以及长沙在建的污泥处理工程等项目，都在进行这方面的应用。

表1

比较参数	高含固消化工艺	传统厌氧消化工艺
有机负荷 (kg VS m ⁻³ d ⁻¹)	6.0	1.5
体积产气率 (m ³ biogas m ⁻³ d ⁻¹)	2.2	0.5
单位体积产能	50294(KJ m ⁻³ d ⁻¹) 14(KWh m ⁻³ d ⁻¹)	12574(KJ m ⁻³ d ⁻¹) 3.5(KWh m ⁻³ d ⁻¹)

2、基于污泥改性预处理的高级厌氧消化技术

该技术是将脱水污泥先进行预处理，得到改性污泥后再进行厌氧消化，可以实现污泥的消毒，提高一定的产气率。其中的预处理阶段主要采用水热反应，解决污泥的流动性，改善传统技术稳定化及脱水性低的缺点，提高消化产气率和容积利用率，降低沼气的含硫量和浮渣的产生量。原污泥粘滞度见图1，不同含固率与消化温度对污泥粘滞度的影响变化见图2。

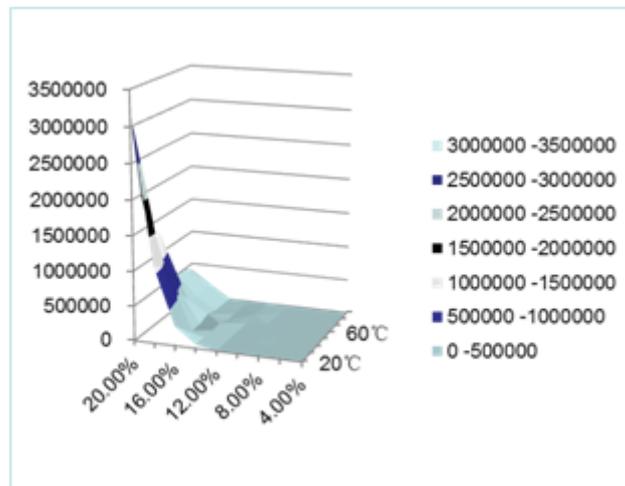


图1 原污泥粘滞度

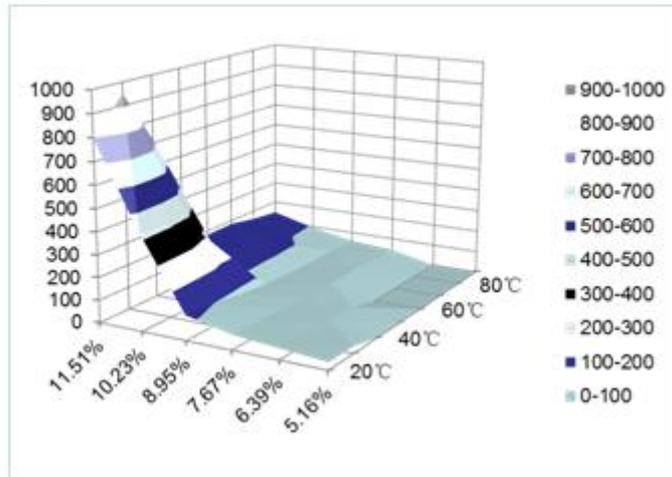


图2 消化污泥粘滞度

3、污泥/有机质高效联合厌氧消化技术

污泥资源化利用的另一重要方向是生产沼气。不过，污泥中有机物含量并不高，因此目前国际上更多采取的是高效联合厌氧发酵的方法，即把污泥和超级市场、菜市场产生的有机质一起进行处理，这是一种比较合理的选择。一方面有利于污泥的处理，另一方面，污泥的酸碱度较高，在餐厨垃圾和有机质的厌氧消化过程中，如果有污泥作为介质，效率会更高，运行也更为稳定。比如德国法兰克福工业园区的厌氧消化项目，污泥投加量是70%，其他有机质是30%，虽然污泥对于产气率的贡献只有30%，但在其中却起到了非常重要的作用。如果污泥处理采用BOT运行模式，这一处理方式会有更好的前景，尤其是对于一些大型污水处理厂而言，联合厌氧消化技术是未来的一个发展方向。

污泥与餐厨垃圾联合厌氧消化技术的优势主要有：

- (1) 提高系统稳定性，降低抑制物浓度；
- (2) 提高产气效益，产气率提高3倍以上，产气率 $0.9\text{m}^3/\text{kgVS}$ （去除）；
- (3) 提高VS降解率，非污泥有机质降解 $\geq 80\%$ ；
- (4) 设施利用率高，在不增加体积的情况下，可同时消纳厨余垃圾等城市有机质。

4、沼液处理厌氧氨氧化技术

污泥厌氧消化处理后的会剩余大量的沼液，其成分及含量主要是： $\text{NH}_4\text{-N}$ ：500-3000ppm、COD：200-5000ppm、BOD：100-2500ppm、P：10-200ppm。对于这

类污泥产生的渗滤液处理有一定的困难，目前在国际上对于这部分渗滤液的处理是采用厌氧氨氧化技术，在国外该技术已经比较成熟，德国的赫尔辛基有几十座采用污泥厌氧氨氧化技术的污水处理厂，但在我国尚处于起步阶段。

5、污泥热解气化技术

在我国，大部分污泥处理处置的途径是焚烧，但是焚烧会产生二次污染，随着国家对环境的重视及人们对环境意识的提高，污泥焚烧的发展会受到一定的限制。在这种情况下，污泥热解气化技术有一定应用前景，在日本已经广泛运用，在我国的武汉、张家港也有中试设备，相信将来污泥热解气化技术会逐渐取代污泥焚烧技术。

6、污泥亚临界水反应技术

一般认为水处于200-374℃、10-22MPa时的状态，称为水的亚临界状态，污泥在该种环境下会实现碳化，其中的有机物在这种亚临界状态可直接与O₂或空气进行燃烧反应。流程图见图3。

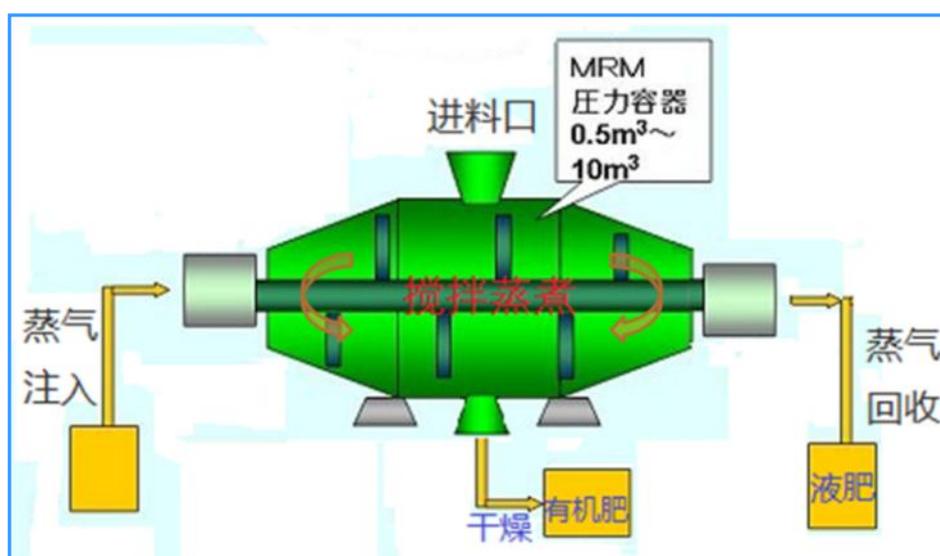


图3

7、污泥协同焚烧技术

污泥协同焚烧是污泥热处理的发展趋势之一，国内已在北京、嘉兴、广州等地的水泥厂和发电厂实现了规模化工程示范应用。主要包括与火力发电厂或垃圾焚烧厂协同焚烧和污泥的水泥窑焚烧。

五、技术创新未来的发展趋势

我国对于污泥处理处置新技术的创新主要有三方面的考量：温室气体的排放，能源资源短缺及水土流失、粮食安全。

总体而言，污泥处理处置仍然是一个世界难题，对于污泥处理技术的发展趋势主要有：能源、资源回收效率提升，系统效率提升，污泥重金属无害化技术开发，污泥中持久性有机物的处理。主要的研究方向在于新材料开发利用、生物科技（优势菌种）及先进装备的开发。

六、面临的挑战和瓶颈

我国在污泥处理处置上主要面临着我国污泥泥质特点和政策的瓶颈，阻碍着我过污泥处理处置的发展，主要体现在以下几方面：

1、我国泥质不稳定，有机质低（发达国家VSS/SS为60%–70%，我国VSS/SS为30%–50%）；含砂量高（污水处理厂普遍采用了圆形沉砂池，脱砂效率低；大量的基建、施工建设导致泥砂水排入污水管网系统等）；重金属含量高（工业污水源头重金属处理系统不完善）；

2、我国污泥处理处置装备的集成能力相对国外较差；

3、我国污泥处理费用没有落实，国家对污泥处理的补贴政策没有相应跟上；

4、如何使污泥回用到土地，在我国目前还是一个很大的问题。