

不同预处理方式对污泥厌氧发酵的影响*

张万钦¹ 戚丹丹¹ 吴树彪² 董仁杰² 赵万生³

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 北京峻德安装工程有限公司, 北京 100079)

摘要: 污水生物处理的应用产生了大量污泥,污泥的处理与处置已成为污水处理厂面临的一个重大挑战。填埋、焚烧等传统污泥处理方法,不仅污染环境而且消耗大量能源,而厌氧发酵处理作为一种可持续的污泥处理方法具有保护环境、节约能源等优点。传统的污泥厌氧发酵处理存在反应效率低、污泥降解性差、停留时间长等不足,污泥预处理在改善其厌氧发酵性能方面越来越受到关注。根据污泥的理化特性、厌氧发酵特点,论述了各类预处理方式的不同作用机制,分类比较了不同类型预处理的处理效果及其对污泥厌氧发酵特性的影响,深入分析了影响不同预处理强化污泥厌氧发酵的主要因素。同时,对其强化污泥厌氧发酵存在的不足及其今后的发展方向作了简要的分析和展望。

关键词: 污泥 厌氧发酵 预处理

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0187-12

引言

随着我国城市人口数量和城市化进程的快速发展,城市污水产量不断增加,污水处理厂的数目、处理能力和污泥产生量也随之增加。据住房城乡建设部统计,截止2012年底全国累计建成城镇污水处理厂3340座,污水日处理能力约为1.42亿m³,年污泥产生量接近2200万t^[1]。目前,虽然我国多数城镇污水处理厂实现了污泥的初步减量化,但仍未能充分实现污泥的稳定化处理。据统计约有80%的污泥未经稳定化处理而导致污泥中恶臭物质、病原体、持久性有机污染物等进一步扩散,造成严重的环境污染^[2]。因此,污泥的稳定化处理在我国污泥环境友好型可持续处置过程中具有重要意义。

目前,我国主要的污泥稳定化处理技术包括厌氧发酵、填埋、干化焚烧等^[3]。其中填埋、焚烧的土地利用处置方式因其选址难、耗能高、投资大等缺点,应用推广受到限制;而厌氧发酵过程所需能量消耗较低,并且在回收清洁能源、减少污泥体积、杀灭病原微生物和改善污泥性能等方面具有明显优势^[4],这使得污泥的厌氧发酵技术逐渐成为具有广泛应用前景的污泥环境友好型资源化利用的途径之一。然而,传统的污泥厌氧发酵过程因反应缓慢、污

泥停留时间长(20~30d)、甲烷产量低和污泥降解性差等缺点,严重限制了污泥厌氧发酵技术的推广应用。针对污泥厌氧发酵过程中胞外聚合物(EPS)难降解、细胞壁难打破等问题,国内外学者在污泥预处理改善污泥厌氧发酵性能方面,开展了大量研究和应用实验,研究发现预处理可以促进EPS降解、提高污泥中大分子有机物水解、打破污泥菌体细胞壁,有效提高污泥厌氧发酵性能、缩短水力停留时间。然而,当前对污泥预处理提高污泥厌氧发酵性能等的研究多种多样且缺乏系统性归纳总结,使污泥厌氧发酵的应用受到了限制。本文根据污泥的理化特性、厌氧发酵特点,讨论污泥厌氧发酵的研究特点及不足,根据各类预处理方式的不同作用机制,分类比较不同类型预处理的作用特点与处理效果及其对污泥厌氧发酵特性的影响。

1 污泥厌氧消化理化特性

城市污水处理厂污泥类型主要包括初沉污泥、二沉污泥、活性污泥、剩余污泥和消化污泥等5种。其中初沉污泥是从初沉淀池直接排出的沉淀物;二沉污泥是从二次沉淀池(或沉淀区)排出的沉淀物;活性污泥是指曝气池中繁殖的含有各种好氧微生物群体的絮状体污泥;消化污泥指经过好氧消化或厌

收稿日期: 2013-12-04 修回日期: 2014-01-04

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD14B03、2012BAD47B00)

作者简介: 张万钦,博士生,主要从事产业化沼气与能源生态工程研究,E-mail: wqzhangcau@gmail.com

通讯作者: 吴树彪,讲师,博士,主要从事生物质能源工程与低碳技术研究,E-mail: wushubiao@gmail.com

氧消化的污泥,所含有机物质浓度较高;剩余污泥是活性污泥系统中从二次沉淀池排出系统外的活性污泥。表 1 列出了不同类型污泥的主要组成^[1,5-6]。

表 1 不同污泥特性指标的含量(以干质量计)
Tab.1 Content of different sludge characteristics indicators^[1,5-6]

类型	挥发性固体质量	有机质质量	灰分质量
	分数/%	分数/%	分数/%
初沉污泥	60 ~ 90	60 ~ 80	20 ~ 40
活性污泥	60 ~ 88	61 ~ 75	25 ~ 39
消化污泥	30 ~ 60	30 ~ 60	40 ~ 70

污泥主要由有机残片、无机颗粒、细菌菌体和胶体等组成,其主要组分是蛋白质、多糖、脂类等有机物;同时还含有大量病原微生物、重金属、氮、磷等富营养化元素及其它有害物质^[4]。表 2 为污泥物质组成^[6-7]。

表 2 污泥有机成分组成
Tab.2 Organic ingredients of sludge

污泥组分	灰分	蛋白质	碳水化合物	脂肪	半纤维素	纤维素	木质素
质量分数/%	40	20	11	6	3	1	19

由表 2 可以看出,污泥中有一半以上固体为可利用的有机物质。污泥作为污染物转移的形态,具有组成成分复杂、变异性大的特点,如不适当处理,会严重污染水体、土壤和大气环境。

2 污泥厌氧发酵的研究及应用进展

国内外学者对污泥厌氧发酵处理进行了深入的研究。

在欧洲,厌氧发酵已经成为处理污泥的主要方法,如比利时、德国、希腊和西班牙,厌氧消化法占有所有污泥处理方法的 比例分别为 67%、64%、97% 和

65%^[8]。在日本大多数污水处理厂也采用厌氧发酵来处理污泥且近年来日本的污泥发酵工艺也在进一步改善,如通过机械浓缩脱水后进行厌氧消化、并进行搅拌和热效的改善等^[9]。为降低消化时间,减小池容,采用高温厌氧发酵的处理厂数量也在增加。

鉴于厌氧发酵技术在污泥资源化利用方面的优势,我国从 20 世纪末期开始尝试采用该技术处理污水厂污泥。表 3 列举并分析了我国部分污水处理厂污泥厌氧发酵运行参数与情况。由表 3 可知我国城市污水处理厂污泥厌氧发酵中挥发性固体(VS)去除率、单位产气量均明显偏低,这可能是由于供微生物利用的有机物质主要存在于污泥菌体细胞内,而污泥菌体的细胞壁和细胞膜对有机物质具有天然保护作用,进而导致由微生物所分泌的水解酶对污泥有机物的水解速率低,从而限制了整个污泥厌氧发酵过程的快速发展。戴前进等^[7]进行了理论产气量的估算研究,结果表明,新鲜污泥(含水率 96% ~ 97%)的沼气产量为 0.2 L/g,仅占污泥的理论产气量的 34.5%(污泥理论产气量约 0.58 L/g); Battimelli 等^[10]的研究也表明,污泥厌氧消化的 COD 去除率仅为 38%。为解决这些问题,可从提高加强污泥预处理等方面入手。污泥预处理可打破胞壁(膜),将有机质释放,使得有机物质能够被微生物分解利用,提高污泥的水解速率、改善发酵性能^[11]。但针对污泥厌氧发酵不同的预处理方式在污泥厌氧发酵中的应用近几年才得到重视,且对于不同种类预处理方式的 处理效果缺乏全面的梳理和汇总。因此本文对 不同种类污泥预处理方法在污泥厌氧发酵作用原理及其对污泥理化性质的影响等方面进行综述,旨在为利用污泥预处理来提高污泥厌氧发酵性能的研究提供科学的参考依据。

表 3 我国污水处理厂污泥厌氧发酵(中温)效果比较
Tab.3 Sludge mesophilic anaerobic fermentation parameters and indexes in some wastewater treatment plants

处理厂名称	pH 值	挥发性固体 质量分数/%	单位有机质产气 量/(m ³ ·kg ⁻¹)	单位体积污泥产 气量/(m ³ ·m ⁻³)	负荷/ (kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	有机物 降解率/%	参考文献
上海白龙港	7.1 ~ 7.4		0.807		1.21	33.5 ~ 70.1	[12-13]
重庆鸡冠石	6.5 ~ 7.5	30 ~ 39		8.5	1.08	24	[14]
天津东郊		55		7 ~ 8		30 ~ 45	[15-17]
天津纪庄子	6.5 ~ 7.5	50		6 ~ 10	1.0 ~ 2.0	30 ~ 50	[18]
武汉三金潭	7.0 ~ 7.5	40 ~ 45	0.75			40 ~ 45	[15]
郑州王新庄				12.14			[19]
北京高碑店	5.9 ~ 7.5	50		8.2		36	[15-16]
北京小红门		70	0.93			51.6	[20-21]
杭州四堡	6.6 ~ 7.2			7 ~ 9		30	[16,22]
海口白沙门		40	0.50 ~ 0.68	4.5 ~ 6.0		45	[23]

3 污泥预处理方法

限制污泥水解的主要因素有 2 个,一是污泥菌体细胞外有大量 EPS 的紧密包裹,二是污泥菌体细胞胞壁(膜)的阻隔^[7]。因为污泥中的有机物质是微生物的全部营养供体,一方面包裹在污泥菌体外的 EPS,主要是一些难以被降解利用的大分子胶体物质,另一方面易于被微生物降解利用的物质大部分存在于污泥菌体细胞胞壁(膜)内,只有打破细胞壁(膜)将这些有机质释放出来,微生物才能利用它们进行厌氧发酵。污泥预处理技术不仅能促进 EPS 中的大分子物质水解,而且可以打破污泥菌体细胞壁(膜),使得污泥菌体内的易降解物质释放出来,

同时能将胞外难降解利用的大分子物质降解成易于被利用的小分子物质,从而增加污泥中可溶性有机物含量,提高污泥厌氧发酵的水解速率,改善厌氧发酵性能。

目前常用的预处理方法有:化学预处理、机械物理法、生物法及不同预处理组合处理法等^[11,24]。

3.1 污泥厌氧发酵化学预处理

污泥化学预处理法主要利用一些具有腐蚀性(强酸、强碱和强氧化剂等)的化学药品破坏污泥中的微生物细胞壁结构及胞外聚合物;甚至与胞外的大分子有机物发生反应而促进大分子有机物的降解。化学预处理主要包括污泥碱预处理法、污泥臭氧预处理法、污泥 H₂O₂ 预处理法等^[12],见表 4。

表 4 化学预处理效果比较
Tab.4 Comparison of treatment effect of chemical pretreatments

化学法	污泥种类	处理剂量/(COD/TS)	发酵工艺	处理效果	参考文献
O ₃ 预处理	混合污泥	0.1 g/g	批式,33℃	甲烷产量由 110 提至 220 mL/SCOD(+100%)	[25]
	市政污泥	0.1 g/g	批式	甲烷产量由 82 提至 173 mL/SCOD(+110%)	[26]
	活性污泥	0.15 g/g	批式	沼气产量由 150 提高至 367 mL/gSCOD(+145%)	[27]
	活性污泥	0.05 g/g	全混式,35℃	TS 去除率由 31% 提高至 59% (+90%)	[28]
	活性污泥	0.045 g/g	全混式,35℃	TS 去除率达 85%	[28]
	活性污泥	0.16 g/g	全混式,35℃	COD 去除率由 38% 提高至 58% (+53%)	[10]
H ₂ O ₂ 预处理	活性污泥	15 g/L	批式	甲烷产量增加 16%	[29]
	消化污泥	2 g/g	全混式	COD 去除率由 52.2% 提高至 70.1% (+34%)	[30]
	混合污泥	2 g/g	全混式	COD 去除率由 52.2% 提高至 74.6% (+43%)	[30]
	剩余污泥	0.07 g/g	间歇实验	比甲烷产量增加 75% ,VS 去除率增加 57%	[31]
碱预处理	活性污泥	0.3 g/g(NaOH 计)	批式,37℃	COD 转化率由 32% 提高至 42% (+31%)	[32]
	活性污泥	7 g/L(NaOH 计)	批式,37℃	沼气产量由 3 657 mL/L 提高至 5 037 mL/L	[33]
	活性污泥	7 g/L(NaOH 计)	连续,37℃	甲烷产量由 290 mL/g 提高至 520 mL/g	[34]
	活性污泥	1.6 g/L(NaOH 计)	批式,35℃	VS 去除率提高了 94%	[35]
	活性污泥	1.65 g/L(KOH 计) ,pH: 10	批式,35℃	沼气产量提高 30%	[29]
	活性污泥	1.65 g/L(KOH 计) ,pH: 10	连续 35℃	甲烷产量由 88 mL/SCOD 提高至 154 mL/g	[29]

3.1.1 污泥碱预处理法

污泥碱预处理可加快污泥胞外聚合物、污泥菌体细胞胞壁及胞内大分子物质的水解;可与胞膜上的脂类发生皂化反应,破坏细胞膜。

碱对污泥菌体细胞壁(膜)的破坏效果与碱的用量及种类有关,在一定范围内,碱添加量越高污泥融胞效果越好,碱添加量过高会导致污泥 pH 值过高进而对厌氧发酵过程产生负面影响。Jeongsik^[33]等通过向污泥中投加不同量的 NaOH 的研究表明,中温下(35℃),污泥中溶解性 COD 含量随 NaOH 投加量的增加而增加;当 NaOH 投加量为 7 g/L 时,COD 溶解率最高(43.2%),在后续的厌氧发酵过程中,甲烷产量与未预处理污泥相比,从 36.6 L/m³ 提高到 41.5 L/m³。此外,该研究还针对不同碱投加种类对污泥破壁效果进行了对比分析,结果表明在

中温下投加 NaOH、KOH、Mg(OH)₂ 和 Ca(OH)₂ (pH 值调节至 12),使 SCOD 分别提高了 39.8%、36.6%、10.8% 和 15.3%,说明相对于二价碱,一价碱处理效果更好;同时肖本益等^[36]的研究利用正交实验证明了 NaOH、KOH 的破壁效果较 Ca(OH)₂ 好。虽然污泥碱预处理可提高污泥的溶胞性,改善污泥的厌氧消化性能,但是过量的碱添加量会增加发酵液中盐离子浓度,使得污泥后续处理难度提高,并且容易腐蚀设备,提高设备维护成本^[37]。因此为有效改善污泥厌氧消化性能,选择合适的碱投加种类、添加量对调节后续微生物厌氧发酵所需要的适宜 pH 值显得尤为重要。

3.1.2 污泥臭氧预处理法

臭氧具有强氧化性,能有效打破污泥菌体细胞胞壁(膜),使胞内易降解的有机物质释放到胞外,

且臭氧容易渗透进细胞内,破坏细胞,将脱氧核糖核酸(DNA)、核糖核酸(RNA)、蛋白质、脂质类和多糖等大分子聚合物分解成易降解的小分子物质,从而提高污泥厌氧发酵水解速率和改善厌氧发酵效能。

目前国内外关于污泥臭氧预处理对污泥厌氧发酵的相关研究还不完善,可能是由于臭氧的剂量难以准确地控制,一旦 O₃ 投加过量,污泥中的部分可溶性物质将会直接被氧化,造成有机物不可逆转的损耗,从而影响污泥的厌氧发酵性能^[38];但是 O₃ 的强氧化性对污泥中的病原菌具有杀毒灭菌的作用,能有效防止病原菌的扩散、二次污染,满足污泥无害化处理要求。基于污泥臭氧预处理的诸多优点,臭氧处理与厌氧发酵联合处理已经成为污泥预处理后再循环厌氧发酵的一种有效方式^[10,28]。Bougrier 等^[39]研究了臭氧预处理后污泥的污泥厌氧发酵性能,结果表明经臭氧预处理后(剂量为 0.16 g/g 污泥)的污泥产气量为对照组(未经预处理污泥)的 2.25 倍;相似地,Weemaes 等^[25]也证实,臭氧预处理后(每克挥发性固体用 0.16 g 臭氧)污泥的沼气产

量和甲烷产量较未经预处理的污泥,分别提高了 1.8 倍和 2.2 倍。前人的研究表明臭氧预处理能较好地改善污泥的厌氧发酵性能;但 Bougrier 等^[27]也指出臭氧预处理技术对促进污泥 EPS 降解、改善污泥产气性能不如其他预处理方式。

3.1.3 污泥 H₂O₂ 预处理法

H₂O₂ 的氧化性强,其作用效果与臭氧类似,在污泥预处理中也得到了较好的应用。研究显示,污泥经 H₂O₂ (2 g/g) 预处理后,其 SCOD 含量提高了 35%^[30]。

目前 H₂O₂ 预处理主要与微波、热、超声等预处理方式联合使用,单独的 H₂O₂ 预处理对污泥厌氧发酵的影响的研究相对较少^[40-41]。

3.2 污泥厌氧发酵物理预处理法

污泥厌氧发酵物理预处理法主要是指通过一些设备把能量转化为其它的形式(热、机械、射线等)作用于污泥,破坏污泥的细胞壁,释放胞内物质,使污泥由难溶难生物利用的形式转化为易于生物利用的形式。污泥物理预处理方法主要包括热预处理、微波预处理、超声波预处理和辐射预处理等,见表 5。

表 5 不同温度处理对不同种类污泥厌氧发酵产气性能的影响

Tab.5 Effects of different temperatures on anaerobic digestion performance of different kinds of sludge anaerobic				
污泥种类	处理温度、时间	发酵工艺	处理效果	参考文献
活性污泥	70℃, 7 d	批式, 37℃	甲烷产量提高 26%	[42]
	70℃, 7 d	批式, 55℃	甲烷产量未有提高	[42]
	70℃, 9 h	批式, 55℃	提高沼气产量 58%	[43]
	180℃, 60 min	批式, 37℃	甲烷产量提高 90%	[32]
	170℃, 60 min	批式, 35℃	沼气产量提高 45%	[29]
	170℃, 30 min	批式	甲烷产量提高 50%	[44]
	170℃, 30 min	全混式, 35℃	甲烷产量提高 51%	[45]
	170℃, 30 min	半连续	提高沼气产量 40% ~ 50%	[46]
初沉污泥	70℃, 4 d	批式, 37℃	甲烷产量提高 16%	[42]
	70℃, 7 d	批式, 55℃	甲烷产量提高 86%	[42]
	70℃, 2 d	全混式, 55℃	甲烷产量提高 48%	[47]
	50 ~ 65℃, 2 d	全混式, 35℃	甲烷产量提高 25%	[48]

3.2.1 污泥热预处理法

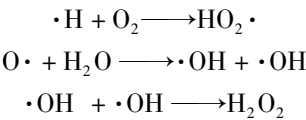
通过加热可使污泥中的部分细胞体受热膨胀而破裂,破坏微生物的细胞壁,将胞内蛋白质和胶质等释放,进而在高温下受热水解,提高污泥水解速率,改善污泥厌氧发酵性能。

许多学者在热预处理(60 ~ 270℃)对污泥厌氧发酵性能的影响方面做了深入研究,研究结果表明污泥热处理的适宜温度为 165 ~ 180℃^[42-43,47-55]。Li 等^[50]在 170℃ 下预处理污泥 30 ~ 60 min 后,进行污泥厌氧发酵实验,发现污泥 VS 去除率达 60%;但 Dwyer 等^[51]的研究发现,当预处理温度为 170 ~ 190℃ 时,虽然增加了可溶性物质含量,但甲烷产量并没有明显提高,这可能是由于 170 ~ 190℃ 的极端

温度下发生了美拉德反应,而美拉德产物具有难降解的特性,因此降低了厌氧产甲烷性能^[52]。同时郭婉茜等^[53]对污泥热处理后的厌氧发酵产氢性能进行了研究,结果表明,热处理可以有效提高其产氢的能力;这是因为高温条件下抑制了接种污泥中产甲烷菌的活性,而有芽孢保护的产氢产丁酸细菌具有较强的耐热性,在高温下不易被杀死,保持了自身的代谢活性^[54];另一方面热处理增加了污泥中大分子有机物的可溶性,进而提高其产氢的能力。虽然热处理可以有效提高大分子物质的水解提高厌氧发酵效率,但肖本益等^[55]指出高温(120 ~ 150℃)预处理需要特定的处理设备,一般污水污泥处理厂不容易满足,且成本较高,在实际应用上有一定限制。

3.2.2 污泥超声波预处理

超声波的处理机制主要分 2 方面:低频时的空穴效应和高频时的化学效应。低频的空穴效应是指低频超声在液体中传播时会产生空化气泡的空化作用,空化气泡在液体中瞬时爆破会产生具有强剪切力和冲击力的超高速射流,能打破污泥菌体细胞壁(膜)及细胞外层的 EPS,使易于被微生物利用的胞内物质释放出来^[56];高频时产生的高温高压等极端的物理环境会促进自由基(OH·HO₂·H·等)的生成,这些自由基化学性质极为活跃,易与污泥中的有机物质发生氧化还原反应。反应式为



许多学者研究了超声波预处理对污泥理化特性及污泥后续厌氧发酵产气性能的影响(表 6)^[57]。Apul 等^[58]在用超声仪进行污泥超声预处理研究(频率 24 kHz、功率 400 W),发现预处理后的污泥 SCOD 由处理前的 50 mg/L 提高至 2 500 mg/L。Tiehm 等^[59]指出 30 ~ 120 min 的超声波预处理可使发酵时间缩短 63.6%,VS 的去除率从 45.8% 提高到 50.3%。Xu 等^[60]的研究也表明,超声波预处理使污泥厌氧发酵效率提高了 7% ~ 8%。

总结前人的研究,发现在超声波预处理中超声

波强度和作用时间是影响超声降解污泥效果的 2 个关键因素。超声波强度与溶液中空化泡数量呈正比关系,空化泡数目增多,污泥菌体细胞胞壁(膜)的破坏程度也随之提高,产气能力越强^[61];但是也有研究表明污泥菌体细胞及接种微生物对超声波敏感性极强,适应声波的范围较小,一旦超过该范围可能会使微生物分泌的酶失活,微生物活性大大降低,从而抑制后续厌氧消化过程^[52],同时当超声波作用于污泥时,会导致污泥温度上升产生超声热效应进一步促进污泥中的有机物水解,提高污泥厌氧发酵性能。此外,Tiehm 等^[59]通过对不同超声波作用时间与污泥 EPS 及菌体细胞破碎效果间的相互关系做了进一步研究,实验采用超声波频率为 41 kHz,处理时间为 7.5 ~ 150 min,结果表明,虽然短时间的超声处理会促进 EPS 的水解,但污泥中的 SCOD 含量未有明显变化,说明污泥菌体细胞胞壁(膜)并未被打破,当作用时间为 30、60 和 150 min 时,SCOD 含量分别提高了 4.7%、13.1% 和 23.7%,这表明长时间超声波处理有效地打破了污泥菌体细胞,释放出胞内有机物。Li 等^[62]的实验表明污泥破解程度越高其脱水性能越佳。综上所述,虽然污泥超声波预处理具有不产生二次污染、分解速率高、处理集中等诸多优点,但其处理能量投入巨大、处理费用较高,且不同种类污泥具体参数难确定,限制了污泥超声预处理在实际中的推广应用^[63]。

表 6 不同超声预处理条件下污泥厌氧发酵效果
Tab. 6 Effects of different ultrasonic pretreatments on anaerobic digestion of sewage sludge

污泥种类	处理剂量	厌氧消化条件	处理效果	参考文献
剩余污泥	8 000 kJ/kg, 31 kHz	CSTR, 37℃	VS 去除率增加 31%	[64]
	6 250 kJ/kg, 20 kHz	间歇实验, 35℃	沼气产量增加 51%	[65]
	20 kHz, 200 W, 30 min	批式, 37℃	沼气产量提高 138%	[66]
	200 W, 9 kHz, 30 min	批式, 36℃	VS 甲烷产量由 210 mL/g 提高至 345 mL/g	[67]
混合污泥	3.6 kW, 31 kHz	CSTR, 37℃	VS 去除率由 45.8% 提高至 50.3% (+9%)	[68]
	13.7 W/cm ² , 20 kHz, 60 s	CSTR, 35℃	沼气产量增加 45%	[69]
	20 kHz, 180 W, 60 s	批式, 35℃	沼气产量提高 24%	[70]
	41 kHz, 150 min	CSTR, 35℃	VS 去除率由 21.5% 提高至 33.7% (+36%)	[71]
活性污泥	20 kHz, 0.33 W/mL, 20 min	批式, 35℃	TS 甲烷产量由 200.2 mL/g 提高至 408.8 mL/g	[72]
	20 kHz, 7 000 ~ 15 000 kJ/kg	批式, 35℃	甲烷产量提高 40%	[73]
	20 kHz, 108 000 kJ/kg	批式, 37℃	沼气产量提高 84%	[74]
	20 kHz, 9 690 kJ/kg	批式, 36℃	沼气产量提高 44%	[75]

3.2.3 污泥微波预处理法

微波预处理是近年出现的污泥破解新方法,该方法能通过热效应及非热效应 2 种方式打破污泥菌体细胞胞壁(膜),提高污泥厌氧发酵过程中的水解速率。其中微波的热效应是指微波可以引起污泥中水分子振荡,升高污泥温度,产生热效应,进而改变微生物蛋白质的二级、三级结构。微波处理污泥的

非热效应是指污泥菌体细胞胞壁(膜)上的大分子在由微波形成的交变电场中发生氢键的断裂,破坏了胞壁(膜)结构,使得胞内物质释放到胞外,提高水解速率^[76-77]。Eskicioglu 等^[78]进行了污泥微波预处理实验,研究发现在 50 ~ 96℃ 时,其对大分子物质的水解作用与污泥热预处理法相同,未发现明显的微波非热效应;但在后续的厌氧发酵实验中,发

现微波的非热效应能提高污泥中温厌氧发酵产沼气的量。Park 等^[77]的研究表明,通过 600 kJ/L 的微波破解污泥,SCOD 与 TCOD 的比值提高了 8.5 倍。Eskicioglu^[78]在实验室条件下采用微波预处理工艺模拟传统水浴加热方法,结果表明,当微波预处理温度分别达到 50、75 和 96℃ 时,SCOD/TCOD 由未经处理的 9.1% 分别增加至 12.1%、21.0% 和 24.1%,此时微波预处理温度与污泥水解破壁程度呈现一定的线性相关性;但在影响微波预处理的众多因素中(如功率、作用时间、作用温度等),任意因素的变化均会导致污泥厌氧发酵性能的较大变化^[79],因此实际应用中如何选择、控制微波,需要进行深入研究。

3.2.4 污泥机械预处理法

机械预处理是利用机械处理过程中产生的剪切力,破坏污泥上包裹的 EPS 及污泥菌体细胞胞壁(膜),释放胞内有机物。常用的污泥机械预处理方法主要有离心破碎法、高压破壁法和机械转动磨球破碎法等。Dohanyos 等^[80]用离心破碎法预处理污泥后经过 25 d 的厌氧发酵,发现污泥产气量较未机械预处理组提高了 85%。而国外的实际应用效果表明,污泥离心破碎预处理法可使污泥产气量提高 15% 以上^[81]。Onyeche 等^[82]用高压破壁预处理法处理污泥后污泥厌氧发酵沼气产量提高了 30%。Baier 等^[83]用机械转动磨球破碎预处理法处理污泥,经过 21 d 的中温厌氧发酵后发现产气量较未预处理组增加了 10%。

虽然污泥机械预处理方法采用的是纯物理处理方式,没有臭气等二次污染物的产生,但污泥机械预处理方式无法实现彻底有效的污泥消毒杀菌,同时,污泥机械预处理的相关处理设备很容易出现堵塞、腐蚀等问题,维护费用相对较高,因此实际应用也相对较少^[84]。

3.3 污泥厌氧发酵生物预处理法

常用的污泥厌氧发酵生物预处理法有 2 种,一是向污泥中投加生物活性酶,分解污泥菌体细胞壁(膜),同时使不易水解的大分子有机物水解成易于被微生物利用的小分子有机物质;二是直接投加能分泌活性酶的菌群,如投加能分泌胞外酶、溶菌酶等的菌群。溶菌酶是一种糖苷水解酶,以污泥菌体细胞胞壁(膜)中的粘性多糖为底物,作用于多糖中 N-乙酰葡萄糖胺(NAG)-乙酰胞壁酸(NAM)之间的 B-1,4 糖苷键,促进胞壁(膜)的水解;同时活性酶还可以将大分子有机物分解成小分子有机物,作为菌群生长的营养物质^[85]。表 7 列出了不同微生物和酶制剂预处理对污泥厌氧发酵性能的影响。杨永林^[86]用嗜热菌 AT07-1 对污泥进行预处理后,发现污泥中 TSS 含量明显提高,这可能与嗜热菌 AT07-1 分泌的胞外蛋白酶和淀粉酶等生物活性酶类有关。Barjenbruch^[87]和潘维等^[88]分别采用溶菌酶和淀粉酶对污泥进行了预处理,但 Barjenbruch 发现溶菌酶处理后污泥的甲烷产率仅提高 10% 左右,这可能与菌剂处理时间有关;而用淀粉酶预处理 4 h 后污泥的水解效果最佳,污泥 SCOD 与 TCOD 的比值从处理前的 6.4% 提高至 30.9%,可溶性蛋白含量提高了 7.7 倍,可溶性糖含量提高 50.7 倍。

目前污泥生物预处理方面的研究还处于实验阶段。虽然生物预处理对提高污泥产沼气效果较其他预处理方法低^[89],且处理过程中会有大量刺激性气体生成^[90],但污泥生物预处理方法具有在较短的停留时间内集中产气的优点,这对减少反应容积,提高污泥产沼气效率都有极大的好处。同时污泥生物预处理法具有易于操作、能量消耗较低,对设备少损耗等诸多优点,在未来的应用中具有广阔的前景。

表 7 污泥生物预处理对厌氧发酵的影响
Tab.7 Effects of bio-pretreatments on anaerobic digestion of sewage sludge

处理法	菌种/酶制剂	处理效果	参考文献
添加菌群	嗜热菌 AT07-1	促进了总悬浮固体的溶解	[86]
	产氢菌(<i>Clostridium bifermentans</i>)	氢气产率由 0.16 mg/g 提高至 1.8 mg/g	[91]
	粘液细菌(<i>Myxococcus xanthus xanthus</i> ATCC 25232)	VSS 去除率由 9.8% 提高至 62%	[92]
	假单胞菌、放线菌	产甲烷能力提高了 29%	[93]
添加酶	纤维素酶(Cellulase)和链霉蛋白酶 E(PronaseE)	VSS 去除率由 20% 提高至 80%;TSS 去除率达到 80%	[94]
	淀粉酶	SCOD/TCOD 从 6.4% 增加到 30.9%	[88]
	溶菌酶	TSS/TS 从 26% 提高到 48%,甲烷产率仅提高了 10%	[87,95]

3.4 污泥厌氧发酵联合预处理法

由于不同的污泥预处理方法作用原理各不相同,近年来不少研究者将不同种类污泥预处理方法组合进行比较研究^[63]。因为不同种类预处理方法在联合作用时,彼此间可以互相促进,增强处理

效果。目前常用的组合方式是物理预处理法与化学预处理法的联合使用,主要包括污泥热化学预处理法、污泥微波预处理与其他技术联合处理技术、污泥超声波预处理与其他技术联合处理技术等。

3.4.1 污泥热化学预处理法

常用的热化学处理法是热碱处理法联合预处理。该预处理能够有效提高污泥的 SCOD 含量,提高污泥厌氧发酵产气量,进一步改善污泥的厌氧发酵性能,其处理效果优于常温下碱解预处理。如 Jeongsik 等^[33]采用碱与 120℃ 污泥热碱组合预处理进行研究,发现处理 30 min 后 SCOD 与 TCOD 比值明显提高,在经过后续厌氧发酵实验后,甲烷产量较未预处理组合增加了 34.3%,SCOD 去除率提高了 67.8%。此外,Heonh 等^[96]对食品加工厂污泥(TS 质量分数 3%)进行了 45 mmol/L 的 NaOH 与温度分别为 25、35 和 55℃ 的污泥热碱联合预处理研究,结果表明 SCOD 质量分数随温度上升而上升,分别为 28%、31% 和 38%;产沼气量分别增加了 66%、73% 和 88%,说明在 45 mmol/L NaOH 作用下,热碱联合预处理效果随热处理温度上升而提高。Vlyssi 等^[97]采用 CaO 作为碱处理剂,进行污泥热碱联合预处理研究,热碱处理组合 pH 值分别为 8、9、10 和 11,对应热处理温度为 50、60、70、80 和 90℃,结果表明:处理组合 pH 值 11,温度 90℃ 时处理效果最佳,VSS 去除率提高至 45%,SCOD 含量提高至 70 g/L;研究发现该处理组合在厌氧发酵 15 d 后,VSS 含量降低了 46%,产甲烷量达到了 0.28 L/g。由此可见,污泥热、碱联合预处理法在提高污泥菌体细胞胞壁(膜)破裂效果、改善污泥的厌氧发酵性能等方面具有良好的效果,且热与碱之间具有很好的协同效应。

3.4.2 污泥微波预处理与其他技术联合处理

3.4.2.1 污泥微波预处理与氧化剂联合处理技术

微波或 H_2O_2 单独作用时均对污泥菌体细胞具有较强的破碎效果,而当两者联合作用于污泥时,微波还可促进 H_2O_2 分解形成 $OH\cdot$,从而进一步增强了 H_2O_2 的氧化能力,获得了更好的污泥水解破碎效果^[98]。Eski^[99]进行了污泥微波、微波与 H_2O_2 联合预处理的研究比较,结果表明,微波处理后再采用氧化剂 H_2O_2 (1 g/g) 处理,污泥 SCOD 与 TCOD 的比值由微波单独处理时的 15.0% 提高至 24.1%。同时 Eski^[99]的研究进一步证明,高温(120℃)对微波与 H_2O_2 联合预处理具有促进作用,TS 溶解率可达 24%,这可能是高温提高了 H_2O_2 转化为 $OH\cdot$,促进了污泥菌体细胞壁的破裂。但后期厌氧消化实验中发现 120℃ 温度处理,污泥甲烷产量反而降低了,仅在 100℃ 温度处理时甲烷产量有一定的提高,可能原因是在污泥的微波-氧化剂预处理过程中有一部分有机物被过度氧化了。

3.4.2.2 污泥微波与碱联合预处理技术

污泥微波与碱联合预处理可有效提高污泥水解速率,使污泥菌体细胞能够在短时间内、较低能量损耗下实现胞壁(膜)的破裂。Dogan 等^[100]进行了污泥微波与碱联合预处理的实验研究(其中 pH 值分别为 10、11、12 和 12.5),研究结果显示,污泥中的 SCOD 与 TCOD 的比值由未预处理时的 0.5% 分别提高至 18%、0.27%、0.34% 和 0.37%,经后续中温厌氧发酵实验发现,当 pH 值为 12 时的微波-碱联合预处理组合处理效果最佳,甲烷产量较未预处理组提高了 18.9%,污泥 TSS、VSS 和 COD 量含量分别降低了 24.9%、35.5% 和 30.3%,脱水性能提高了 22%。

有研究者对污泥单独微波预处理、污泥微波与酸联合预处理、污泥微波与碱预处理、污泥微波与氧化剂(H_2O_2)联合预处理、微波 + H_2O_2 + 碱联合预处理等 5 种微波联合工艺组合进行了对比研究,发现 5 种组合处理的 SCOD 含量依次为 15.8%、15.0%、13.7%、19.2% 和 15.0%,说明微波与 H_2O_2 处理组合的处理效果相对更好,而微波与碱处理组合的处理效果最差,但是在实际研究中,微波与碱处理组合的处理条件容易控制,研究最深入,应用也更为广泛。

3.4.3 超声波与其他技术的联合处理

目前超声波处理的联合处理技术研究主要集中于与碱预处理的联合处理研究。超声具有迅速释放污泥菌体细胞胞内物质的优点,但是在促进大分子物质水解作用方面效果不佳,而碱处理刚好与之相反,因此污泥超声/碱预处理能够弥补污泥超声预处理、碱预处理单独作用时的不足,进一步提高污泥的厌氧发酵性能。杨洁等^[101]对污泥超声、碱、超声波与碱联合预处理进行了对比研究,结果表明,超声波与碱联合预处理组合对提高污泥 SCOD 含量、VSS 去除率的效果均明显优于超声波、碱单独预处理;其中,VSS 去除率在单独超声波、碱预处理时分别为 16.0%、22.1%,而超声波与碱联合预处理 VSS 去除率达 51.5% ~ 54.5%。赵庆良等^[102]采用 1.5 W/mL 超声、pH 值为 11 预处理组合处理污泥,研究发现预处理后污泥的 TCOD、VS 和 VSS 的去除率均较对照组(未预处理污泥)有了很大的提高,三者分别提高了 29.6%、58.9% 和 28.6%。诸多研究者认为污泥的超声波预处理与碱预处理联合处理方法能够提高对污泥菌体细胞的破解效果,主要是因为,一方面超声处理时会产生强烈的振荡,这有利于碱与污泥 EPS 及污泥菌体细胞壁脂类物质的充分接触反应;另一方面污泥整体的碱性生物环境有利

于超声波自由基的形成,进一步加强了超声的声化学反应。Iwona 等^[103]对污泥超声波与碱联合预处理研究进行了深入研究,研究发现,超声波与碱(NaOH 处理剂量分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 g/g)联合处理时,污泥相应的 SCOD 含量比对照组(未经预处理污泥)分别提高了 26、33、43、50、53 和 54 倍。

4 结论与展望

采用污泥超声波预处理法、热预处理法、微波预处理法、碱预处理法、臭氧氧化预处理法等均可以有效促进有机物溶解,使之更易被微生物降解利用,增加水解速率,缩短厌氧发酵时间。然而每一种方法均有其不足之处,在未来应用过程中,需进一步优化组合各项预处理工艺,以实现预处理效果的最优化。

(1)机械预处理方面。可以从如何设计新的仪器设备,以降低运行和仪器维护费用方面深入研究,从而使其得以更好地推广。

(2)污泥热处理方面应针对热处理机理的盲点区进行深入探索。如:探究污泥在热预处理过程中怎样由对包裹在细胞外的 EPS 的结构破损并进一步向污泥菌体细胞壁(膜)的破碎过程转变等;如何避免污泥高温热处理时产生可降低污泥降解性

能的难降解物质(多聚氮等)。

(3)污泥碱预处理法虽然能够很好地提高污泥厌氧发酵性能,但其日产气量以及 VS 去除率与碱添加种类及投加量之间并没有确定的比例关系,在实际应用很难精确控制,未来应在建立不同碱及用量与不同类型污泥之间的模型关系方面进行深入研究。

(4)污泥臭氧预处理法能有效水解污泥中的大分子物质,打破菌体细胞壁(膜),但其处理费用较高,且臭氧投加量难以精确控制,可能对厌氧发酵产生不利影响。今后研究应注重于不同臭氧投加量间的比较分析,寻找最佳投加量,同时深入研究对投加量的精准化控制。

(5)对于污泥微波预处理方面,国内研究相对较少,其中微波的非热效应对污泥厌氧发酵效能的作用机制尚不明确,应在这方面进行更加细致的研究。

(6)联合应用多种预处理方式促进污泥厌氧发酵产沼气。此外,还应结合我国污水处理厂污泥处理现状采取不同种类污泥预处理技术的优化处理组合,扬长避短,在实际应用中探索出操作简便、费用较低,又可以提高污泥厌氧发酵性能的高效污泥预处理方案。

参 考 文 献

- 1 蔡伟梅. 城市污水厂污泥特性及综合利用分析——以深圳、佛山、广州三市为例[J]. 资源节约与环保, 2013(6): 30–31.
- 2 台明青,贾东方,张丽莉,等. 城市污泥厌氧消化处理研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(12): 21–24.
Tai Mingqing, Jia Dongfang, Zhang Lili, et al. Research and development on disposal of sewage sludge[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2006, 24(12): 21–24. (in Chinese)
- 3 乔显亮,骆永明,吴胜春. 污泥的土地利用及其环境影响[J]. 土壤, 2000, 32(2): 79–85.
- 4 Raf Dewi, Lise Appels, Jan Baeyens, et al. Peroxidation enhances the biogas production in the anaerobic digestion of biosolids[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 146(3): 577–581.
- 5 王睿坤,刘建忠,虞育杰,等. 城市污泥特性及其干化技术[J]. 给水排水, 2010, 36(增刊): 153–157.
- 6 周立祥,胡霁堂,胡忠明. 厌氧消化污泥化学组成及其环境化学性质[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(2): 176–181.
- 7 戴前进,李艺,方先金. 城市污水处理厂剩余污泥厌氧消化试验研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 95–98.
Dai Qianjin, Li Yi, Fang Xianjin. Study on anaerobic digestion of excess activated sludge from municipal wastewater treatment plant[J]. China Water Wastewater, 2006, 24(3): 95–98. (in Chinese)
- 8 王静,卢宗文,田顺,等. 国内外污泥研究现状及进展[J]. 市政技术, 2006, 24(3): 140–142.
Wang Jing, Lu Zongwen, Tian Shun, et al. Existing state and development of sludgy researches in domestic and foreign[J]. Municipal Engineering Technology, 2006, 24(3): 140–142. (in Chinese)
- 9 曹秀芹,陈爱宁,甘一萍,等. 污泥厌氧消化技术的研究与进展[J]. 环境工程, 2008, 26(增刊): 215–219.
- 10 Battimelli A, Millet C, Delgenès J P, et al. Anaerobic digestion of waste activated sludge combined with ozone post-treatment and recycling[J]. Water Science & Technology, 2003, 48(4): 61–68.
- 11 牟艳艳,于鑫,郑正,等. 污泥厌氧消化预处理方法研究进展[J]. 中国给水排水, 2004, 20(7): 31–33.
Mu Yanyan, Yu Xin, Zheng Zheng, et al. Research progress on pretreatment method of anaerobic sludge digestion[J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(7): 31–33. (in Chinese)
- 12 魏海娟,蒋零燕,王刚,等. 白龙港污水处理厂混合污泥厌氧消化工艺试验[J]. 净水技术, 2011, 30(4): 44–47.
Wei Haijuan, Jiang Lingyan, Wang Gang, et al. Experimental on anaerobic digestion processes of mixed sludge in Bailonggang wastewater treatment plan[J]. Water Purification Technology, 2011, 30(4): 44–47. (in Chinese)
- 13 张辰,胡维杰,生骏. 上海市白龙港污水处理厂污泥厌氧消化工程设计[J]. 给水排水, 2010, 36(10): 9–11.

- 14 张小燕. 鸡冠石污水处理厂污泥厌氧消化处理运行实践[J]. 自动化与仪器仪表, 2009(4):115-119.
- 15 朱昱. 武汉市三金潭污水处理厂污泥消化系统的设计[J]. 给水排水, 2009, 35(8):40-43.
- 16 吴静, 姜洁, 周红明. 我国城市污水处理厂污泥产沼气的前景分析[J]. 给水排水, 2009, 35(增刊1):101-104.
Wu Jing, Jiang Jie, Zhou Hongming. Analysis on biogas production of sludge digestion from municipal wastewater treatment plants in China[J]. China Water Wastewater, 2009, 35(Supp.1):101-104. (in Chinese)
- 17 周甯. 天津东郊污水处理厂工艺设计的若干特点[J]. 中国给水排水, 1993, 9(2):20-23.
- 18 周杨. 污泥厌氧消化系统的调试及运行管理[C]//天津市土木工程学会给水排水分科学会第六届第一次年会论文集, 2010:652-658.
- 19 李霞, 李国金, 郭淑琴, 等. 郑州王新庄污水处理厂污泥消化系统设计及运行[J]. 给水排水, 2007, 33(7):13-16.
- 20 孙翼垆, 宋晓雅. 小红门污水处理厂卵形消化池启动探讨[J]. 科技创新导报, 2011(10):128-129.
- 21 宋晓雅, 杨向平, 王东生. 大型污泥厌氧消化系统的启动与运行调控[J]. 给水排水, 2011, 37(3):32-34.
- 22 严国奇, 黄小华. 四堡污水处理厂卵形污泥消化池运行情况分析[J]. 给水排水, 2009, 35(8):27-31.
- 23 潘伯寿, 卢志, 孙传志. 海口市污水处理厂污泥消化的运行分析[J]. 中国给水排水, 2006, 22(24):91-94.
Pan Boshou, Lu Zhi, Sun Chuazhi. Operational analysis of sludge digestion in wastewater treatment plant in Haikou city[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(24):91-94. (in Chinese)
- 24 贾舒婷, 张栋, 赵建夫, 等. 不同预处理方法促进初沉/剩余污泥厌氧发酵产沼气研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(1):193-198.
Jia Shuting, Zhang Dong, Zhao Jianfu, et al. Research on different pre-treatment methods for improving anaerobic digestion of primary/excess sludge of biogas production[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(1):193-198. (in Chinese)
- 25 Weemaes M, Grootaerd H, Simoons F, et al. Anaerobic digestion of ozonized biosolids[J]. Water Research, 2000, 34(8):2330-2336.
- 26 Yeom I T, Lee K R, Lee Y H, et al. Effects of ozone treatment on the biodegradability of sludge from municipal wastewater treatment plants[J]. Water Science & Technology, 2002, 46(4-5):421-425.
- 27 Bougrier C, Battimelli A, Delgenes J P, et al. Combined ozone pretreatment and anaerobic digestion for the reduction of biological sludge production in wastewater treatment[J]. Ozone: Science & Engineering, 2007, 29(3):201-206.
- 28 Goel R, Tokutomi T, Yasui H, et al. Optimal process configuration for anaerobic digestion with ozonation[J]. Water Science & Technology, 2003, 48(4):85-96.
- 29 Valo A, Carrère H, Delgenès J P. Thermal, chemical and thermo-chemical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2004, 79(11):1197-1203.
- 30 Rivero J A C, Madhavan N, Suidan M T, et al. Enhancement of anaerobic digestion of excess municipal sludge with thermal and/or oxidative treatment[J]. ASCE Journal of Environmental Engineering, 2006, 132(6):638-644.
- 31 Ponsá S, Ferrer I, Vázquez F, et al. Optimization of the hydrolytic acidogenic anaerobic digestion stage (55°C) of sewage sludge: Influence of pH and solid content[J]. Water Research, 2008, 42(14):3972-3980.
- 32 Tanaka S, Kobayashi T, Kamiyama K I, et al. Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge[J]. Water Science & Technology, 1997, 35(8):209-215.
- 33 Jeongsik K, Chulhwan P, Tak-Hyun K, et al. Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2003, 95(3):271-275.
- 34 Park C, Lee C, Kim S, et al. Upgrading of anaerobic digestion by incorporating two different hydrolysis processes[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, 100(2):164-167.
- 35 Lin J G, Chang C N, Chang S C. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization[J]. Bioresource Technology, 1997, 62(3):85-90.
- 36 肖本益, 刘俊新. 污水处理系统剩余污泥碱处理融胞效果研究[J]. 环境科学, 2006, 27(2):319-323.
Xiao Benyi, Liu Junxin. Study on treatment of excess sludge under alkaline condition[J]. Environmental Science, 2006, 27(2):319-323. (in Chinese)
- 37 Penaud V, Delgenes J P, Moletta R. Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: Influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1999, 25(3-5):258-263.
- 38 张杰, 文湘华, 朱洪涛, 等. 常温下剩余污泥水解酸化强化方法研究进展[J]. 中国给水排水, 2009, 25(18):10-15.
Zhang Jie, Wen Xianghua, Zhu Hongtao, et al. Research progress in enhancing hydrolysis and acid-dification of excess sludge at normal temperature[J]. China Water Wastewater, 2009, 25(18):10-15. (in Chinese)
- 39 Bougrier C, Albasi C, Delgenès J P, et al. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2006, 45:711-718.
- 40 王亚炜. 微波-过氧化氢协同处理剩余污泥的效能与机理研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2009.
- 41 Neyens E, Baeyens J, Weemaes M, et al. Pilotscale peroxidation as an advanced oxidation technique[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 98(1-3):91-106.

- 42 Gavala H N, Yenal U, Skiadas I V, et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge effect of pre-treatment at elevated temperature[J]. *Water Research*, 2003, 37(19):4561–4572.
- 43 Climent M, Ferrer I, Baeza M D, et al. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 133(1–3):335–342.
- 44 Fernandez-Polanco F, Velazquez R, Perez-Elvira S I, et al. Continuous thermal hydrolysis and energy integration in sludge anaerobic digestion plants[J]. *Water Science & Technology*, 2008, 57(8):1221–1226.
- 45 Bougrier C, Delgenes J P, Carrere H. Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2006, 84(4):280–284.
- 46 Yang X, Wang X, Wang L. Transferring of components and energy output in industrial sewage sludge disposal by thermal pretreatment and two-phase anaerobic process[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(8):2580–2584.
- 47 Lu J Q, Gavala H N, Skiadas I V, et al. Improving anaerobic sewage sludge digestion by implementation of a hyper-thermophilic prehydrolysis step[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4):881–889.
- 48 Ge H, Jensen P D, Batstone D J. Pre-treatment mechanisms during thermophilic-mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge[J]. *Water Research*, 2010, 44(1):123–130.
- 49 Neyens E, Baeyens J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 98(1–3):51–67.
- 50 Li Y Y, Noice Y. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment[J]. *Water Science & Technology*, 1992, 26(3–4):857–866.
- 51 Dwyer J, Starrenburg D, Tait S, et al. Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability[J]. *Water Research*, 2008, 42(18):4699–4709.
- 52 潘丽红, 姚林宏, 吴菊清, 等. 简述美拉德(Maillard)反应[J]. *中国调味品*, 2008(4):25–28.
Pan Lihong, Yao Linhong, Wu Juqing, et al. Reviews on the Maillard reaction[J]. *China Condiment*, 2008(4):25–28. (in Chinese)
- 53 郭婉茜, 任南琪, 王相晶, 等. 接种污泥预处理对生物制氢反应器启动的影响[J]. *化工学报*, 2008, 59(5):1283–1287.
Guo Wanqian, Ren Nanqi, Wang Xiangjin, et al. Comparative study of influence of inoculating sludge with different pre-treatments on start-up process in EGSB bio-hydrogen producing reactor[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, 59(5):1283–1287. (in Chinese)
- 54 Liu D W, Liu D P, Raymond J, et al. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two stage fermentation process[J]. *Water Research*, 2006, 40(11):2230–2236.
- 55 肖本益, 阎鸿, 魏源送. 污泥热处理及其强化污泥厌氧消化的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(4):673–682.
Xiao Benyi, Yan Hong, Wei Yuansong. State of the art of thermal sludge pretreatment and its enhancement for anaerobic sludge digestion[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4):673–682. (in Chinese)
- 56 Chu C P, Chang B V, Liao G S, et al. Observations on changes in Ultrasonically treated waste-activated sludge[J]. *Water Research*, 2001, 35(4):1038–1046.
- 57 叶正祥, 张栋. 超声波对污泥脱水及厌氧消化影响的研究进展[J]. *水处理技术*, 2010, 36(2):1–4.
- 58 Apul O G, Sanin F D. Ultrasonic pretreatment and subsequent anaerobic digestion under different operational conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(23):8984–8992.
- 59 Tiehm A, Nick K, Ne U. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization[J]. *Water Research*, 2001, 35(8):2003–2009.
- 60 Xu H, He P, Yu G, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on anaerobic digestion and its sludge dewaterability[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(9):1472–1478.
- 61 Piyasena P J, Mohareb E, McKellar R C. Inaction of microbes using ultrasound: a review[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2003, 87(5):207–216.
- 62 Li H, Jin Y, Rasool B M, et al. Effects of ultrasonic disintegration on sludge microbial activity and dewaterability[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2–3):1421–1426.
- 63 胡亚冰, 张超杰, 谭学军, 等. 强化污泥厌氧消化预处理技术的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(4):1737–1739.
Hu Yabing, Zhang Chaojie, Tan Xuejun, et al. Research progress on pre-treatment processes of sludge anaerobic digestion[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(4):1737–1739. (in Chinese)
- 64 Ge H, Jensen P D, Batstone D J. Pre-treatment mechanisms during thermophilic-mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge[J]. *Water Research*, 2010, 44(1):123–130.
- 65 Aoki N, Kawase M. Development of high-performance thermophilic two phase digestion process (review paper)[J]. *Water Science & Technology*, 1991, 23(7–9):1147–1156.
- 66 Onyeche T I, Schlafer O, Bormann H, et al. Ultrasonic cell disruption of stabilised sludge with subsequent anaerobic digestion[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1–8):31–35.
- 67 Wang Q, Kuninobo M, Kakimoto K, et al. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 68(3):309–313.

- 68 Tiehm A, Nickel K, Neis U. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 36(11):121 – 128.
- 69 Nielsen H B, Mladenovska Z, Ahring B K. Bio-augmentation of a two stage thermophilic (68°C/55°C) anaerobic digestion concept for improvement of the methane yield from cattle manure[J]. *Journal of Bioscience & Bioengineering*, 2007, 97(6): 1638 – 1643.
- 70 Bien J B, Malina G, Bien J D, et al. Enhancing anaerobic fermentation of sewage sludge for increasing biogas generation[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2004, 39(4):939 – 949.
- 71 Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, et al. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization[J]. *Water Research*, 2001, 35 (8):2003 – 2009.
- 72 Chu C P, Lee D J, Chang B V, et al. “Weak” ultrasonic pretreatment on anaerobic digestion of flocculated activated biosolids [J]. *Water Research*, 2002, 36 (11):2681 – 2688.
- 73 Bougrier C, Carrère H, Delgenès J P. Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 106(2):163 – 169.
- 74 Salsabil M R, Prorot A, Casellas M, et al. Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 148 (2 – 3):327 – 335.
- 75 Erden G, Filibeli A. Ultrasonic pre-treatment of biological sludge: consequences for disintegration, anaerobic biodegradability, and filterability[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2009, 85(1):145 – 150.
- 76 Baniks, Bandyopadhyays, Ganguly S. Bio-effects of micro-wave-abrief review[J]. *Bioresour. Technol*, 2003, 87(2):155 – 159.
- 77 Park B, Ahn J H, Kim J, et al. Use of microwave pretreatment for enhanced anaerobiosis of secondary sludge[J]. *Water Science & Technology*, 2004, 50(9):17 – 23.
- 78 Eskicioglu C, Terzian N, Kennedy K J, et al. A thermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2007, 41(11):2457 – 2466.
- 79 余林锋. 微波破解污泥及其厌氧消化性能的研究[D]. 广州:广东工业大学,2008.
- 80 Dohanyos M, Zabranska J, Jenicek P. Enhancement of sludge anaerobic digestion by using of a special thickening centrifuge[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 36(11):145 – 153.
- 81 Carrère H, Dumas C, Battimelli A, et al. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183:1 – 15.
- 82 Onyeche T I. Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants [C] // IWA Specialist Conferences. Moving Forward Wastewater Biosolids Sustainability, 2007.
- 83 Baier U, Schmidheiny P. Enhanced anaerobic degradation of mechanically disintegrated sludge[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 36(11):137 – 143.
- 84 王永华,徐鹏,赵金保. 污泥厌氧消化预处理的研究进展[J]. *环境科学动态*,2004(4):9 – 11.
- 85 梁鹏,黄霞,钱易,等. 污泥减量化技术的研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*,2003,4(1):44 – 52.
Liang Peng, Huang Xia, Qian Yi, et al. Research progress on sludge reduction technologies[J]. *Techniques and Equipment of Environmental Pollution Control*, 2003, 4(1):44 – 52. (in Chinese)
- 86 杨永林. 剩余污泥嗜热酶溶解预处理的效果研究及其资源化[D]. 长沙:湖南大学,2008.
- 87 Barjenbruch M, Kopplow O. Enzymatic. Mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge[J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 7(3):715 – 720.
- 88 潘维,莫创荣,李小明,等. 外加淀粉酶预处理污泥厌氧发酵产氢研究[J]. *环境科学学报*,2011,31(4):785 – 790.
Pan W, Mo C R, Li X M, et al. Bio-hydrogen production from anaerobic fermentation of sludge pretreated with -amylase[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011,31(4):785 – 790. (in Chinese)
- 89 宋秀兰,周美娜. 污泥预处理技术的研究现状与前景[J]. *水资源保护*,2011,27(6):70 – 74.
Song Xiulan, Zhou Meina. Research progress and prospect of sludge pretreatment technology[J]. *Water Resources Protection*, 2011,27(6):70 – 74. (in Chinese)
- 90 朱冠楠,宋周兵,孔祥锐. 溶胞预处理技术[J]. *环境科技*,2011,24(2):102 – 107.
Zhu Guannan, Song Zhoubing, Kong Xiangrui. Study on anaerobic digestion of excess activated sludge from municipal wastewater treatment plant[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 24(2):102 – 107. (in Chinese)
- 91 Wang C C, Chang C W, Chu C P. Producing hydrogen from wastewater sludge by *Clostridium biofermentans* [J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, 102(1):83 – 92.
- 92 速矢泰典. 剩余污泥的微生物减量方法及装置: 日本,1994 – 106198[P],1994 – 04 – 19.
- 93 Tepe N, Yurtsever D, Mehta R J, et al. Odor control during post digestion processing of bio-solids through bio-augmentation of anaerobic digestion [J]. *Water Science & Technology*, 2008, 59(4):589 – 594.
- 94 Roman H J, Brgess J E, Plutschke B I. Enzyme treatment to decrease solids and improve digestion of primary sewage sludge[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2006, 5(10): 963 – 967.
- 95 Ayol A. Enzymatic treatment effects on dewaterability of anaerobically digested biosolids: performance evaluations[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(7):2427 – 2434.

96 Heonh, Parksc, Leejs, et al. Solubilization of waste activated sludge by alkaline pretreatment and biochemical methane potential (BMP) tests of anaerobic co-digestion of municipal organic waste[J]. Water Science & Technology, 2003, 48(8):211 – 219.

97 Vlyssi Des A G, Karlispk. Thermal-alkaline solubilization of waste activated sludge as a pretreatment stage or anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2004, 91(2):201 – 206.

98 王亚伟,魏源送,肖本益,等. 微波-过氧化氢联合作用处理污泥的影响因素[J]. 环境科学学报,2009,29(4):697 – 702.
Wang Yawei, Wei Yuansong, Xiao Yiben,et al. Factors of sludge pretreatment by the advanced oxidation process of microwave and hydrogen peroxide[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(4):697 – 702. (in Chinese)

99 Eski Ciogluc, Prorota, Marinj, et al. Synergetic pretreatment of sewage sludge by microwave irradiation in presence of H2O2 for enhanced anaerobic digestion[J]. Water Research, 2008, 42(18):4674 – 4682.

100 Dogan I, Sanin F D. Alkaline solubilization and microwave irradiation as a combined sludge disintegration and minimization method[J]. Water Research, 2009, 43(8):2139 – 2148.

101 杨洁,季民,韩育宏,等. 污泥碱解和超声破解预处理的效果研究[J]. 环境科学,2008,29(4):1002 – 1006.
Yang Jie, Ji Min, Han Yuhong, et al. Effect of Alkaline and Ultrasonic Pretreatment on the Sludge Disintegration [J]. Environmental Science, 2008,29(4):1002 – 1006. (in Chinese)

102 赵庆良,苗礼娟,胡凯. 超声/碱预处理剩余污泥的中温厌氧消化效果[J]. 中国给水排水,2009,25(15):25 – 28.
Zhao Qingliang, Miao Lijuan, Hu Kai. Mesophilic anaerobic digestion of excess sludge after ultrasonic and alkaline pretreatment [J]. China Water Wastewater, 2009, 25(15):25 – 28. (in Chinese)

103 Iwona Zawieja, Lidia Wolny, Pawel Wolski. Influence of excessive sludge on conditioning on the efficiency of anaerobic stabilization process and biogas generation[J]. Desalination, 2008, 222(1 – 3):374 – 381.

Effect of Different Pretreatment Methods on Sewage Sludge
Anaerobic Digestion

Zhang Wanqin¹ Qi Dandan¹ Wu Shubiao² Dong Renjie² Zhao Wansheng³
(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China
2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Beijing Jun De Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100079, China)

Abstract: With the widely use of biological wastewater treatment, a large number of sewage sludge (SS) was produced in the process. The treatment of SS has become a major challenge for wastewater treatment plants. Landfill and incineration as traditional methods of sludge treatment not only pollute the environment but also consume a lot of energy. Anaerobic digestion as a sustainable sludge treatment method benefits environmental protection and energy saving. However, traditional anaerobic digestion of sludge treatment has the characters of low efficiency, poor biodegradability and long residence time. Therefore, in order to improve the efficiency of anaerobic digestion of SS, the pretreatments are paid more and more attention. According to the physical and chemical properties and the anaerobic digestion of sludge characteristics, this study assessments the different mechanisms of various sludge pretreatment methods. Simultaneously, different types of sludge pretreatment were classified. And the effects of different types of sludge pretreatment on the characteristics of anaerobic digestion of sludge were compared further. Moreover, the influence factors of different sludge anaerobic digestion treatment were evaluated deeply. Besides, the problems of anaerobic sludge digestion and the direction for the future development of anaerobic sludge digestion were briefly analyzed.

Key words: Sludge Anaerobic digestion Pretreatment