

Progress in the Pretreatment of Sludge Anaerobic Digestion

Fei Wang

Shanghai Urban Drainage Co., Ltd, Shanghai
Email: hpy_002@163.com

Received: May 1st, 2016; accepted: Jun. 6th, 2016; published: Jun. 9th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With the increase of wastewater treatment capacity of wastewater treatment plant in China, the production of excess sludge is increasing day by day, leading to the difficulty in treatment and disposal. The sludge must be stabilized before final disposal because of its high moisture content and rich in organic matter and pathogens. Anaerobic digestion is a common technology for sludge stabilization, especially for large and medium sized wastewater treatment plants, and can be used for production of methane to achieve energy recovery. However, because of the presence of the cell wall, the hydrolysis of sludge is key limited step of anaerobic digestion rate. The pretreatment technologies of sludge can effectively enhance the damage of the cell wall, promoting the intracellular organic matter releasing into aqueous phase, improving the sludge anaerobic digestion performance. The advantages and disadvantages of various pretreatment technologies of sludge anaerobic digestion were reviewed in this study, including biological treatment, thermal hydrolysis, mechanical treatment, chemical oxidation treatment and alkali treatment. At present, the research focuses on the characteristics of the sludge after pretreatment and the improvement of methane production.

Keywords

Sludge, Anaerobic Digestion, Pretreatment Methods, Methane Production

强化污泥厌氧消化性能的预处理技术研究进展

王 非

上海市城市排水有限公司, 上海

Email: hpy_002@163.com

收稿日期: 2016年5月1日; 录用日期: 2016年6月6日; 发布日期: 2016年6月9日

摘要

随着我国城市污水处理厂污水处理量的逐年增加, 剩余污泥产量也日益增大, 导致其处理处置难。污泥因为其含水率高、富含有机质及病原体, 在处理处置之前, 必须进行稳定化处理。厌氧消化是污泥稳定化的常用技术, 特别是针对大中型污水处理厂, 并且可以通过产甲烷, 实现能源回收。但由于细胞壁的存在, 使得污泥水解成为厌氧消化的重要限速步骤。通过一定的预处理作用, 可有效地提高细胞壁的破解效率, 促进胞内有机物的溶出, 大幅缩短污泥厌氧消化周期, 提高污泥厌氧消化性能。本文综述了污泥厌氧消化预处理的各种主要技术的优缺点, 包括生物处理、热水解、机械处理、化学氧化处理和碱处理等技术。目前研究的重点主要集中在预处理后污泥的性质变化及产甲烷性能的改善方面。

关键词

污泥, 厌氧消化, 预处理技术, 产甲烷

1. 引言

在污泥处理处置过程中, 浓缩、预处理、消化、脱水等环节构成整个处理工艺。该处理过程的目的是为了降低有机物含量、减少污泥体积、阻止后续处理处置产生的臭气和病原菌载体[1]。稳定化处理是污泥减量化、无害化的一个重要手段, 也是污泥处理处置的重要环节之一[2]。污泥稳定化的处理方法有很多, 包括生物和化学等方法, 其中厌氧消化是最为常见的一种生物处理法, 具有运行成本低、操作简单温和、稳定性好和能够实现能源回收等优点[3] [4]。但是, 研究表明, 污泥厌氧消化周期一般都较长, 导致处理设施占地大, 并且产气率及产气量较低[5]。传统的中温厌氧消化 20 d 后, 有机物的气体转化效率仅为 25%~60% [6] [7]。为改善污泥厌氧消化性能, 提高产气效率, 必须提高污泥的破解效果, 促进胞内有机质的释放, 增强生物可降解性, 提高微生物的可利用底物浓度, 促进污泥的水解酸化进程, 解除厌氧消化的限速作用, 这就需要对污泥进行一定的预处理。从上世纪 70 年代起, 包括物理、化学、生物以及其联用的方法对污泥进行预处理的研究报道开始相继出现[8]。

2. 预处理方法

2.1. 物理预处理方法

污泥预处理中的物理方法主要包括超声波、微波、聚焦脉冲、高温热解、冻/融、 γ 射线等方法, 但由于物理预处理方法一般对技术的应用要求较高, 操作比较复杂, 很多需要较高的能耗, 所以在现阶段还难以得到大规模的工程化应用。

2.1.1. 热处理

热处理是通过加热, 使污泥中的蛋白质分解, 细胞发生破裂, 胞内的有机物质被释放。随着热解温度的升高, 污泥的溶解性越大。当热处理温度高于 180℃时, 污泥水解速率虽得到明显提高, 但同时会产生一些难溶性的有机物, 其在一定程度上会抑制污泥厌氧消化的进行, 所以, 污泥热处理的效果并不与热解温度成正比。Stuckey 等[9]发现污泥的最佳热处理温度约为 175℃, 超过 200℃, 会导致厌氧消化

产气量下降。

目前,关于污泥热预处理技术的研究报导较多,并且也有了一些工程化的应用。王治军等[10]研究发现,在最佳污泥热水解预处理条件:热水解温度和时间分别为 170℃和 30 min 作用下,可使污泥的 TCOD 去除率提高 1 倍,沼气产率从 160 mL/g 提高到 250 mL/g。Li 等[11]研究表明,污泥的最佳热处理条件为 170℃加热 60 min,通过随后的 5 d 厌氧消化处理,可使 COD 去除率达到 60%。另还有研究表明,经过 175℃热预处理后,污泥厌氧消化产气量比对照高 60%~70% [12]。总之,一般污泥厌氧消化的热预处理温度不会超过 200℃,基本维持在 170℃~175℃作用时间在 30~60 min 之间,即可以有效地促进污泥裂解,提高污泥厌氧产气效果。

另外,污泥热处理可以起到消毒灭菌、减少污泥厌氧消化停留时间、提高产气量的优点,近年来该技术已经在工程中得到应用[13],如挪威的 Hamar 污水处理厂,该厂每年热处理 3200 t 干污泥(DS)耗能 25 kW,污泥产气量较对照提高了 47% [14]。国内在工程应用方面的报导相对较少,只有一些工程示范。污泥经过高温热处理后可直接进行土地利用[15]、卫生填埋[16]等,所以热处理技术是污泥无害化处理的重要技术手段和保障。但是,污泥热水解预处理技术在实际应用过程中还应考虑操作的难易程度以及总体的经济能耗水平。

2.1.2. 超声波预处理技术

超声波是指通过频率为 20~20,000 kHz 的弹性机械波,产生空化作用,从而破坏污泥的絮体结构,具有瞬间穿透力强、能量密度高的特点[17]。通过超声波产生的极端环境条件,可使微生物细胞壁产生裂解,导致胞内有机物和胞内酶释放至液相中,从而促进污泥中细胞壁的溶解,使其释放出更多的有机物,提高可生化性,促进污泥厌氧消化效能。一般而言,超声波能量密度越大,对污泥产生的破解效果就越好。Bougrier 等[18]研究发现,当超声波的能量密度达 1000 kJ/kg (TS,折算成干污泥)时,对污泥絮体产生破坏作用,进而提高后续的产甲烷能力;但当能量密度高于 7000 kJ/kg. TS 时,超声波对污泥产甲烷能力的促进作用不显著。Hogan 等[19]利用低频超声波(100 kHz)对污泥进行预处理,获得较好的效果。目前,超声波对污泥进行预处理的频率一般设定在 20 kHz 左右。蒋建国等[20]研究表明,单频超声波对污泥厌氧消化产气量的促进作用要高于双频超声波。并且,超声波能量密度的提高比超声波作用时间更能促进污泥预处理的效果[21],较高的污泥浓度也能获得更高的超声波能效[17]。另外,近年来,关于超声波预处理对污泥脱水性能的促进作用方面的研究屡有报导[22]。污泥超声波预处理技术在理论上已十分成熟,并且在新加坡、德国和美国等地已经有了工程上的成功应用实例。

总而言之,超声波预处理具有作用时间短、处理能效高、可提升污泥产甲烷能力等优点,并且已经具有成功的工程应用经验,具有很好的发展及应用前景。但是,仍受到污泥参数和超声波发生设备等的限制,在短期内还难以实现大规模的生产化应用。

2.1.3. 微波预处理技术

微波预处理技术是指利用频率为 0.3~300 GHz 的电磁波,对物质进行快速均匀的加热。根据微波预处理的原理,污泥裂解是由微波辐射热效应和非热效应共同作用的结果。热效应是微波预处理促使污泥裂解的主要原因,非热效应作用机理目前尚不明确,但有研究表明,非热效应可能使有机物氢键断裂并改变复杂生物分子结构等的原因[23]。目前,国内外对微波预处理的研究报导较多,但至今尚未有工程应用的先例。微波预处理能够有效提高污泥中有机物的去除率,并提高污泥产甲烷的效率。Park 等[24]利用微波预处理使污泥产气量和 COD 去除率分别提高了 79%和 64%,并且使反应器中的 SRT 缩短一倍以上。Eskicioglu 等[25]对污泥进行微波预处理(温度为 96℃),然后进行厌氧消化,当 SRT 为 5 d 时,污泥的产气量提高了 28%,并且消化后污泥的脱水性能也提高了 39%。Toreci 等[26]对污泥进行微波预处理后,

在较短的 SRT 条件下, 污泥产气量提高了近 1/3, 与较长的污泥 SRT 的对照处理相比, VS 去除率无明显变化。

总之, 微波预处理技术具有速度快、效果好、缩短污泥后续厌氧消化时间、病原菌杀灭效果好、改善污泥脱水性能的优势, 但是, 同样存在运行成本较高、工艺复杂、对设备要求高、难以进行大规模生产化应用等的缺点[27]。在后面的研究中, 应考虑其和其他预处理技术的联用, 使微波预处理技术真正获得在实际中的应用。

2.1.4. 冻/融法

冻/融法是指先将污泥置于低温条件下, 使其结冰凝固, 然后再置于常温下使其融化成液态, 通过这一过程使污泥经历一个膨胀与收缩的过程, 导致絮体破坏、细胞裂解[28]。Ting 等[29]发现冻/融预处理可使污泥获得较好的有机物溶解能力和产甲烷能力。Wang 等[30]考察了不同温度的冻/融预处理对浓缩污泥的效果, 发现其可使溶解性蛋白质和碳水化合物大幅增加, 同时可使污泥产气量提高 27%。

虽然, 冻/融预处理对污泥具有较好的处理效果, 但是, 实验室操作成本较高, 在我国大多数地区进行实际工程运用不合适。考虑到在中国北方, 特别是一些低温地区, 可利用当地的自然条件对污泥进行较为经济的冻/融预处理。

2.2. 化学预处理技术

目前, 污泥化学预处理技术中研究较多的是碱(Alkaline)和臭氧(Ozone)预处理。

2.2.1. 碱预处理

碱预处理是指通过碱的作用, 使污泥中的有机颗粒溶胀、纤维成分溶解, 导致微生物细胞破裂。在预处理过程中, 碱的种类和投加量是影响污泥预处理效果的 2 个关键因素。碱的种类大体可分为 1 价碱(NaOH、KOH)和 2 价碱($Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 等)。其中 2 价碱的水溶性相对较差, 导致污泥预处理效果较低。另外, 碱预处理过程中的 pH 值对污泥溶胀效果起到关键作用, 较低 pH 值只能破坏微生物的絮体结构, 较高 pH 值才能够有效溶解破坏细胞壁和细胞膜, 更高的 pH 值则能使蛋白质变性、脂类皂化、DNA 发生水解[31]。

目前, 国内外对污泥碱预处理已进行了较多的研究。Torres 等[31]利用($Ca(OH)_2$)对污泥进行预处理, 发现 SCOD 增加了 11.5%, 然后对污泥进行厌氧消化, 可使甲烷产气量提高 72%。Kim 等[32]用不同的 1 价碱和 2 价碱分别对污泥进行预处理, 结果显示, 1 价碱对污泥中 SCOD 浓度的增加较为明显, 2 价碱效果较差。胡亚冰等[33]将污泥在 pH 值为 9、10、11 条件下进行 24 h 碱处理后再厌氧消化, 发现经过 pH 越高的碱处理, 污泥的产甲烷量也增加的越多, 最高可达 41%。Alleman 等[34]研究发现, 碱预处理能有效溶解污泥中的硝化纤维, 使其转变为可溶性的有机碳化合物, 进而提高污泥的厌氧消化效果。Lin 等[35]发现, 随着 NaOH 添加量的增加, 污泥厌氧消化性能也随之提高, 且产气中的甲烷含量显著提高。此外, Rajian 等[36]研究发现, 低剂量的 NaOH 预处理对污泥的溶解效果比 $Ca(OH)_2$ 更显著。

综上所述, 碱预处理法的优点为: 能有效地增加污泥的 SCOD 浓度和 VS 去除率、增大产气量、提高产气中的甲烷含量、缩短污泥厌氧消化周期。但是, 加碱预处理过程中容易产生一些抑制厌氧消化反应的难溶性的物质, 并且因为药剂投加的关系导致运行费用较高, 碱预处理后的高 pH 环境不利于产甲烷菌的生长代谢, 同时 Na^+ 和 OH^- 两种离子自身也是厌氧消化的抑制剂, 抑制产甲烷细菌生长, 因此碱处理这种预处理方法在实际使用中还需考虑它的负面影响。

2.2.2. 臭氧预处理

臭氧预处理是指在污泥中通入具有强氧化性的臭氧, 使生物细胞壁组成部分(糖类、脂类、蛋白质等)

被臭氧所氧化,使之转化成小分子后导致细胞壁破裂而释放出有机物,进而臭氧将所释放出来的有机物氧化成小分子甚至溶解状态。臭氧投加量越大,污泥的破解程度越高,释放的有机物越大,但如果臭氧投加过量就可能使释放出的小分子有机物质完全氧化,从而导致后续厌氧消化底物不足,进而影响污泥厌氧消化效果[37]。Zhang等[38]发现当每克干污泥投加的臭氧剂量为50 mg时,污泥的破解效果最佳。Goel等[37]分别采用0.015和0.05 gO₃/gTSS剂量的臭氧对剩余污泥进行预处理,发现污泥的破解程度分别达19%和37%。Yan等[39]采用0.04~1.2 g/gTSS的臭氧投加量对剩余污泥进行预处理,获得35%~60%的污泥裂解效果。在上述试验浓度范围内,随着臭氧投加量的增加,污泥的裂解效果也随之增加。臭氧的工程化运用实例有德国的Schermbeck污水处理厂,当臭氧投加剂量为0.03 g/gTSS和0.06 g/gTSS时,污泥中的SCOD释放量分别达到110和160 mg/g [40],缩短了厌氧消化的SRT,同时熟污泥产量也减少了19%。

虽然臭氧预处理能有效地提高污泥溶解性,但也可使污泥中的部分有机物直接矿化成H₂O和CO₂ [41],导致产气效率下降。另外,臭氧生产耗能较多,导致预处理技术成本较高,不利于该技术的大规模推广应用。

2.3. 生物预处理技术

随着生物技术的快速发展,剩余污泥生物预处理技术越来越受到人们的关注。生物预处理技术主要是指通过生物的方法促进污泥水解反应提高的工艺。最常见的类型为嗜温和高温厌氧或者好氧消化预处理[8]。该领域研究的热点还包括生物酶预处理(Enzyme pretreatment)和生物强化预处理(Enhanced Biological Pretreatment)。

2.3.1. 生物酶预处理

生物酶处理是指直接向污泥中投加酶制剂或投加能够分泌胞外酶的微生物菌剂。胞外酶主要包括蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶等。这些酶能够加快有机物的水解过程,使大分子降解成为易生物降解的小分子,提高污泥的可生化性[42]。Roman等[43]研究表明,投加浓度为0.03%的纤维素酶(Cellulase)和链霉菌蛋白酶E(Pronase E),经过5天的厌氧消化,可使浓缩污泥的SS减少80%,SCOD减少93%,TCOD减少了97%。Davidsson等[44]利用多种酶制剂对污泥进行预处理,可使污泥的产甲烷能力提高60%。Yang等[45]利用浓度为6%的淀粉酶A与中性蛋白酶对污泥进行预处理,结果使VSS的溶解性分别达54.24%和39.70%。当将淀粉酶A与中性蛋白酶以1:3的比例联合处理污泥,可使污泥中的VSS溶解性达到68.43%。

生物酶预处理是一种环境友好型和新兴的生物处理技术,可有效提高污泥中底物的浓度及产甲烷性能,不产生对环境有害的副产物,对仪器设备要求较低,具有较好发展前景。但是该方法对技术和工艺方面要求较高,包括对酶/细菌的选择、处理条件的优化等方面,还需进行深入研究。目前该技术仍处于试验研究阶段,需进一步优化和完善。随着生物工程技术的发展,如果能有效地降低酶制剂和微生物筛选提取成本,对于该方面的应用和推广具有十分重要的意义。

2.3.2. 生物强化

生物强化预处理是指向污泥中投加具有特定功能的微生物菌剂来改善污泥厌氧消化性能。该技术在一定程度上包括了向污泥中投加产生胞外酶的微生物技术。一般的高温好氧细菌,可分泌蛋白酶等在内的水解酶,并且可在中温厌氧条件下存活,促使污泥厌氧消化性能提高。将自行分离到的高温厌氧消化细菌SPT2-1投入污泥中进行预处理,经过1天的消化处理,污泥溶解率即达40% [46],产甲烷量提高50%。Tepe等[47]利用投加假单胞菌、放线菌等微生物制剂对浓缩污泥进行预处理,使其产甲烷能力提高29%。

总的来说,生物强化预处理与生物酶处理类似,具有操作简单、无污染等优点,但是也同样存在成本相对较高的问题。随着现代生物工程技术及分子生物学的发展,生物强化处理技术越来越具有广阔的应用前景。

2.4. 联合预处理技术

因为每一种预处理技术都有其各自不同的优缺点,在充分了解其优缺点和作用机理的基础上,有目的联合,能够有效地提高污泥的预处理效果。目前研究的热点主要集中在物理/机械方法与化学方法的联合使用,包括微波与 H_2O_2 联合预处理、热与 H_2O_2 联合预处理、微波与碱联合预处理、热与碱联合预处理、超声波与碱联合预处理[48]等。对上述的联合预处理方法,由于化学预处理需要投加额外化学药剂,这就使得部分研究人员认为联合预处理方法并不经济,需要额外的成本[49]。

2.4.1. 微波 - H_2O_2 联合

微波和 H_2O_2 单独作用都能对污泥产生较大的裂解效果,提高厌氧消化和脱水性能。对两种预处理技术进行联合作用,发现微波辐射能促进 H_2O_2 分解生成 $\text{OH}\cdot$, 从而获得更好的污泥裂解效果[42], 并且,随着微波处理温度的升高,促使更多的 H_2O_2 分解成 $\text{OH}\cdot$, 进而提高污泥的产甲烷反应速率。消化后的熟污泥脱水性能得到较大的改善。Wang 等[50]研究表明,微波和 H_2O_2 的联合作用的最佳方式为:先通过微波处理,使过氧化氢酶失活,然后再投加 H_2O_2 , 两者的最佳比为 0.1~1。当微波温度为 120°C 时,利用两者联合对污泥进行预处理,处理后污泥的 TSS 溶解率可达 24%,但在污泥产甲烷性能试验中却发现,当微波温度过高,不利于污泥的产甲烷性能的提高,这是由于污泥预处理过程中部分有机物被过度氧化导致厌氧消化过程中的底物浓度不足造成[42]。

2.4.2. 热 - H_2O_2 联合

目前对于热 - H_2O_2 联合预处理的研究,主要集中在工艺参数优化和处理效果方面,对其中的具体反应机理尚未深入研究。Camacho 等[51]投加浓度为 6% 的 H_2O_2 , 分别在 60°C 和 95°C 的温度下对污泥进行 1 h 的预处理,可使污泥中 TOC 的释放量达 195 mg/L 和 553 mg/L。单独进行 60°C 和 95°C 热预处理,污泥中 TOC 的释放量仅为 145 mg/L 和 153 mg/L,说明高温和 H_2O_2 联合处理污泥效果更佳。CachoRivero 等[52]对剩余污泥进行为期 30 d 的中温间歇式污泥厌氧消化试验,每天取 20% 的污泥在进行热与 H_2O_2 联合预处理(90°C 、2 g $\text{H}_2\text{O}_2/\text{g}$ (VSS))后再返回原反应器,使反应器的产气速率提高了 40%, TSS 去除率提高了 25%。

2.4.3. 微波 - 碱联合

微波与碱联合预处理可使有机物水解速率加快,使污泥在较短停留时间和较低微波能耗下实现裂解,增加污泥厌氧消化产气量,改善熟污泥的脱水性能。Doğan 等[53]对污泥进行碱与微波联合预处理,结果表明,污泥的破解程度有了大幅提高,后续的厌氧消化试验表明,在较高碱浓度条件下,对污泥进行微波预处理能够获得更大的产甲烷量(比对照提高了 18.9%),同时污泥的脱水性能也提高了 22%。

2.4.4. 热 - 碱联合

热 - 碱联合预处理对污泥的作用机理基本与微波 - 碱联合预处理一致。Neyens 等[54]对污泥进行了热 - 碱联合预处理试验($\text{pH} = 10$ 、 $T = 100^\circ\text{C}$),仅经过 1 h 处理,可使污泥中的有机物溶解了 60%,脱水性能提高 35%,病原菌基本灭杀。Vlyssides 等[49]将剩余污泥在 $\text{pH} = 11$ 、 $T = 90^\circ\text{C}$ 的条件下预处理 10 h,经过高温为期 15 天的厌氧消化,使 VSS 减少 46% 左右,产甲烷量也达到了 0.28 L/g。

除此之外,还有一些其它污泥联合预处理方法,如超声波与碱联合预处理等[55],这里不再对其一一

进行述叙。

3. 结论

从发达国家的污泥处置现状看, 土地利用将是未来的发展趋势, 污泥厌氧消化技术未来将会被广泛利用。污泥厌氧消化与预处理技术是密不可分的, 因此, 研究和开发高效合理的污泥厌氧消化预处理技术是污泥厌氧消化的发展方向之一。

采用各种预处理方法对污泥进行处理, 都能有效地促进有机物的溶解, 增加污泥的可生化性, 促进水解反应的发生, 缩短污泥厌氧消化停留时间。同时, 某些预处理方法也可有效地提高产酸率和产气率。但是, 各种预处理方法均有其不足之处, 采用多种预处理技术联合方式, 往往能够取得比较好的效果。因此, 将不同的预处理方法进行优化组合, 扬长避短, 确定最佳组合工艺条件, 以达到最佳的污泥厌氧消化性能, 是今后研究的主要方向之一。考虑到实际上的工业化应用, 应将研究的重点放在相对低能耗, 反应条件温和的预处理方法上, 对于能耗高, 反应条件苛刻且具有一定危险性, 以及预处理成本过高, 不具有大规模应用价值。

参考文献 (References)

- [1] USEPA, Standards for the Use or Disposal Sewage Sludge, Final Rules 40 CFRPart 257. US Environmental Protection Agency. 1993.
- [2] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局.《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [3] Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J. and Dewil, R. (2008) Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Progress in Energy Combustion Science*, **34**, 755-781. <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2008.06.002>
- [4] Lorenzo, B., Serena, C., Fabio, O., et al. (2007) Microbial Processes Associated to the Decontamination and Detoxification of a Polluted Activated Sludge During Its Anaerobic Stabilization. *Water Research*, **41**, 2407-2416. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2007.02.046>
- [5] Devlin, D.C., Esteves, S.R.R., Dinsdale, R.M., et al. (2011) The Effect of Acid Pretreatment on the Anaerobic Digestion and Dewatering of Waste Activated Sludge. *Bioresource Technology*, **102**, 4076-4082. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.043>
- [6] Parkin, G.F. and Owen, W.F. (1986) The Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludge. *Journal of Environmental Engineering*, **112**, 867-920. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1986\)112:5\(867\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:5(867))
- [7] Bhattacharya, S.K., Madura, R.L., Walling, D.A. and Farrel, J.B. (1996) Volatile Solids Reduction in Two Phase and Conventional Anaerobic Sludge Digestion. *Water Research*, **30**, 1041-1048. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00252-9](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(95)00252-9)
- [8] Carrerea, H., Dumasa, C., Battimellia, A., et al. (2010) Pretreatment Methods to Improve Sludge Anaerobic Degradability: A Review. *Journal of Hazardous Materials*, **183**, 1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129>
- [9] Stuckey, D.C. and McCarty, P.L. (1984) The Effect of Thermal Pretreatment on the Anaerobic Biodegradability and Toxicity of Waste Activated Sludge. *Water Research*, **18**, 1343-1353. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(84\)90002-2](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(84)90002-2)
- [10] 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.
- [11] Li, Y.Y. and Noice, T. (1992) Upgrading of Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge by Thermal Pretreatment. *Water Science and Technology*, **26**, 857-866.
- [12] 董誉. 微波-纳米磁粉协同预处理剩余污泥的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2010.
- [13] Kepp, U., Machenbach, I., Weisz, N., et al. (2000) Enhanced Stabilization of Sewage Sludge through Thermal Hydrolysis-3 Years of Experience with Full-Scale Plant. *Water Science and Technology*, **42**, 89-96.
- [14] 戴前进, 方先进, 邵辉煌. 城市综合污水处理厂污泥厌氧消化的预处理技术[J]. 中国沼气, 2006, 25(2): 11-12.
- [15] Singh, R.P. and Agrawal, M. (2008) Potential Benefits and Risks of Land Application of Sewage Sludge. *Waste Management*, **28**, 347-358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>
- [16] Fytilli, D. and Zabaniotou, A. (2008) Utilization of Sewage Sludge in EU Application of Old and New Methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 116-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>

- [17] Farooq, R., Rehman, F., Baig, S., *et al.* (2009) The Effect of Ultrasonic Irradiation on the Anaerobic Digestion of Activated Sludge. *World Applied Science Journal*, **6**, 234-237.
- [18] Bougrier, C., Albasi, C., Delgenès, J.P. and Carrère, H. (2006) Effect of Ultrasonic, Thermal and Ozone Pre-Treatments on Waste Activated Sludge Solubilization and Anaerobic Biodegradability. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **45**, 711-718. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2006.02.005>
- [19] Hogan, F., Mormede, S., Clark, P. and Crane, M. (2004) Ultrasonic Sludge Treatment for Enhanced Anaerobic Digestion. *Water Science and Technology*, **50**, 25-32.
- [20] 蒋建国, 张妍, 张群芳, 陈懋喆, 杜雪娟. 超声波对污泥破解及改善其厌氧消化效果的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2815-2819.
- [21] Pére-Elvira, S., Fdz-Polanco, M., Plaza, F.I., Garralón, G. and Fdz-Polanco, F. (2009) Ultrasound Pretreatment for Anaerobic Digestion Improvement. *Water Science and Technology*, **60**, 1525-1532. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2009.484>
- [22] Shao, L.M., Wang, G.Z., Xu, H.C., Yu, G.H. and He, P.J. (2010) Effects of Ultrasonic Pretreatment Sludge Dewaterability and Extracellular Polymeric Substances Distribution in Mesophilic Anaerobic Digestion. *Journal of Environmental Sciences*, **22**, 474-480. [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60132-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60132-7)
- [23] Eskicioglu, C., Terzian, N., Kennedy, K.J., Droste, R.L. and Hamoda, M. (2007) A Thermal Microwave Effects for Enhancing Digestibility of Waste Activated Sludge. *Water Research*, **41**, 2457-2466. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.008>
- [24] Park, B., Ahn, J.H., Kim, J. and Hwang, S. (2004) Use of Microwave Pretreatment for Enhanced Anaebiosis of Secondary Sludge. *Water Science and Technology*, **50**, 17-23.
- [25] Eskicioglu, C., Droste, R.L. and Kennedy, K.J. (2007) Performance of Anaerobic Waste Activated Sludge Digestion after Microwave Pretreatment. *Water Environment Research*, **79**, 2265-2273. <http://dx.doi.org/10.2175/106143007X176004>
- [26] Toreci, I., Kennedy, K.J. and Droste, R.L. (2009) Evaluation of Continuous Mesophilic Anaerobic Sludge Digestion after High Temperature Microwave Pretreatment. *Water Research*, **43**, 1273-1284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.022>
- [27] Tang, B., Yu, L.F., Huang, S.S., Luo, J.Z. and Zhuo, Y. (2010) Energy Efficiency of Pre-Treating Excess Sewage Sludge with Microwave Irradiation. *Bioresourc Technology*, **101**, 5092-5097. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.132>
- [28] Xie, M., Shi, Z. and Liu, X.B. (2008) Influential Factors of Freeze-Thaw Conditioning of Sludge from Water Purification Plant. *Industrial Water and Wastewater*, **39**, 92-95.
- [29] Ting, C.H. and Lee, D.J. (2007) Production of Hydrogen and Methane from Wastewater Sludge Using Anaerobic Fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**, 677-682. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.06.063>
- [30] Wang, Q.H., Fujisaki, K., Ohsumi, Y. and Ogaw, H.I. (2001) Enhancement of Dewaterability of Thickened Waste Activated Sludge by Freezing and Thawing Treatment. *Journal of Environmental Science and Health*, **36**, 1361-1371. <http://dx.doi.org/10.1081/ESE-100104884>
- [31] Torres, M.L. and Lloréns, M.D.C.E. (2008) Effect of Alkaline Pretreatment on Anaerobic Digestion of Solid Wastes. *Waste Management*, **28**, 2229-2234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.006>
- [32] Kim, J., Park, C., Kim, T., *et al.* (2003) Effects of Various Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **95**, 271-275. [http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)80028-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1723(03)80028-2)
- [33] 胡亚冰, 张超杰, 张辰, 周琪. 碱解处理对剩余污泥融胞效果及厌氧消化产气效果[J]. 四川环境, 2009, 28(1): 1-4.
- [34] Alleman, J.E., Kim, B.J., Quivey, D.M. and Equihua, L.O. (1994) Alkaline Hydrolysis of Munitions-Grade Nitrocellulose. *Water Science and Technology*, **30**, 63-72.
- [35] Lin, J.G., Chang, C.N. and Chang, S.C. (1997) Enhancement of Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge by Alkaline Solubilization. *Bioresourc Technology*, **62**, 85-90. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00121-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00121-1)
- [36] Rajan, R.V., Lin, J.G. and Ray, B.T. (1989) Low-Level Chemical Pre-Treatment for Enhanced Sludge Solubilization. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, **61**, 1678-1683.
- [37] Goel, R., Tokutomi, T., Yasui, H. and Noike, T. (2003) Optimal Process Configuration for Anaerobic Digestion with Ozonation. *Water Science and Technology*, **48**, 85-96.
- [38] Zhang, G.M., Yang, J., Liu, H.Z. and Zhang, J. (2009) Sludge Ozonation: Disintegration, Supernatant Changes and Mechanisms. *Bioresourc Technology*, **100**, 1505-1509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.08.041>

- [39] Yan, S.T., Chu, L.B., Xing, X.H., Yu, A.-F., Sun, X.-L. and Jurcik, B. (2009) Analysis of the Mechanism of Sludge Ozonation by a Combination of Biological and Chemical Approaches. *Water Research*, **43**, 195-203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2008.09.039>
- [40] Sievers, M., Ried, A. and Koll, R. (2004) Sludge Treatment by Ozonation—Evaluation of Full-Scale Results. *Water Science and Technology*, **49**, 247-253.
- [41] 万金保, 吴声东, 王嵘, 曾海燕. 臭氧对活性污泥性状的影响[J]. 环境化学, 2009, 28(2): 223-227.
- [42] Dursun, D., Turkmen, M., Abu-Orf, M. and Dentel, S.K. (2006) Enhanced Sludge Conditioning by Enzyme Pretreatment: Comparison of Laboratory and Pilot Scale Dewatering Results. *Water Science and Technology*, **54**, 33-41. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2006.544>
- [43] Roman, H.J., Brgess, J.E. and Pletschke, B.I. (2006) Enzyme Treatment to Decrease Solid and Improve Digestion of Primary Sewage Sludge. *African Journal of Biotechnology*, **5**, 963-967.
- [44] Davidsson, A., Wawrzynczyk, J., Norrlov, O. and La Cour Jansen, J. (2007) Strategies for Enzyme Dosing to Enhance Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. *Journal of Residuals Science and Technology*, **4**, 1-7.
- [45] Yang, Q., Luo, K., Li, X.M., et al. (2010) Enhanced Efficiency of Biological Excess Sludge Hydrolysis under Anaerobic Digestion by Additional Enzymes. *Bioresource Technology*, **101**, 2924-2930. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.012>
- [46] Miah, M., Tada, C., Yang, Y. and Sawayama, S. (2005) Aerobic Thermophilic Bacteria Enhance Biogas Production. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **7**, 48-54. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-004-0125-y>
- [47] Tepe, N., Yurtsever, D., Duran, M., Mehta, R.J., Bruno, C. and Punzi, V.L. (2008) Odor Control during Post-Digestion Processing of Biosolids through Bioaugmentation of Anaerobic Digestion. *Water Science and Technology*, **59**, 589-594. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2008.008>
- [48] 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.
- [49] Vlyssides, A.G. and Karlis, P.K. (2004) Thermal-Alkaline Solubilization of Waste Activated Sludge as a Pretreatment Stage for Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*, **91**, 201-206. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00176-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00176-7)
- [50] Wang, Y.W., Wei, Y.S. and Liu, J.X. (2009) Effect of H₂O₂ Dosing Strategy on Sludge Pretreatment by Microwave-H₂O₂ Advanced Oxidation Process. *Journal of Hazardous Materials*, **169**, 680-684. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.001>
- [51] Camacho, P., Deleris, S., Geaugey, V., Ginestet, P. and Paul, E. (2002) A Comparative Study between Mechanical, Thermal and Oxidative Disintegration Techniques of Waste Activated Sludge. *Water Science and Technology*, **46**, 79-87.
- [52] Cacho Rivero, J.A., Madhavan, N., Suidan, M.T., Ginestet, P. and Audic, J. (2006) Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Municipal Sludge with Thermal and/or Oxidative Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, **132**, 638-644. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:6\(638\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:6(638))
- [53] Doğan, I. and Sanin, F.D. (2009) Alkaline Solubilization and Microwave Irradiation as a Combined Sludge Disintegration and Minimization Method. *Water Research*, **43**, 2139-2148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.023>
- [54] Neyens, E., Baeyens, J. and Creemersm C. (2003) Alkaline Thermal Sludge Hydrolysis. *Journal of Hazardous Materials*, **97**, 295-314. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00286-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00286-8)
- [55] 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.