

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.015

污泥预处理的几种新技术

张源凯,王洪臣,庄 健

(中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要:介绍了几种污泥预处理新技术:电磁场预处理技术、辐射预处理技术、生物水解预处理技术,分析它们的原理、特点、处理效果以及今后研究方向,旨在为污泥资源化技术发展提供参考。

关键词:剩余污泥;资源化;预处理技术;厌氧消化

中图分类号:X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2014)04-0071-07

New technologies for sludge pretreatment

ZHANG Yuankai, WANG Hongchen, ZHUANG Jian

(School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: This paper introduces several new technologies for sludge pretreatment, which include electromagnetic field pretreatment technology, radialization pretreatment technology, and biological hydrolysis pretreatment technology. The theories, characteristics, and treatment efficiencies of these technologies are described. The future development of the technologies is analyzed. This study provides references for the development of sludge resource recovery technologies.

Key words: wasted sludge; resources recovery; pretreatment technology; anaerobic digestion

污水处理厂在处理污水过程中会产生大量的剩余污泥,污泥体积通常占污水处理总体积的 0.3%~1.0%^[1]。目前我国每年排放的干污泥大约为 130 万 t,并以大约 10% 的速率增加^[2]。剩余污泥中含有大量的污染物,如重金属、内分泌干扰剂、多氯联苯、多环芳烃以及二噁英等^[4],这些污染物如果得不到妥善处理,会对环境造成严重的二次污染。剩余污泥的处理费用巨大,一般占城市污水处理厂总费用的 40%~60%^[3]。目前对污泥处理多采用污泥厌氧消化的方法^[5]。厌氧消化过程主要有水解、酸化、产乙酸和产甲烷 4 个阶段,其中,水解过程由于厌氧微生物所需要的营养物质大部分存在于污泥絮体以及微生物的细胞膜(壁)内部原生质中,胞外分泌酶无法与营养基质充分有效地接触,严重限制了厌氧消化的速率^[6]。因此,要对污泥进行预处理,即破碎污泥絮体和污泥细胞膜(壁),使营养

基质得以释放,加快整个厌氧消化过程^[7-8]。

为提高污泥厌氧消化效率,许多污泥破壁或溶胞预处理技术正在研发之中。笔者综述国内外已有报道且具有良好应用前景的几种污泥预处理技术,将这些技术归纳为电磁场、辐射以及生物处理等污泥预处理技术,并分析它们的原理、特点、处理效果以及发展方向。

1 污泥电磁场预处理技术

电磁场预处理技术主要包括电场、磁场以及电磁波等处理技术。电场和电磁波方面主要包括聚焦脉冲技术和微波技术;而在磁场方面,国内外的主要研究方向是加强活性污泥法污水处理效果^[9]和污泥脱水性能的改善^[10]。李帅等^[11]在研究磁场对污泥的脱水性能时,发现在磁场作用下,污泥滤液中的 COD 和 NH₄⁺ 质量浓度都在短时间内升高, COD 质

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07316-001);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA063404)

作者简介:张源凯(1986—)男,硕士研究生,研究方向为水污染控制工程。E-mail:zyk11@ruc.edu.cn

通信作者:王洪臣,教授。E-mail:whc@ruc.edu.cn

量浓度的最大变化率为 60%,说明在磁场作用下,污泥细胞有一定程度的破壁,因此磁场污泥预处理技术有望成为一种有效的污泥预处理技术。本文推荐使用强脉冲磁场进行污泥预处理,因为随着磁场强度或脉冲数的增加,磁场杀菌效果越好^[12],污泥破壁效果也可能更好。

1.1 聚焦脉冲预处理技术

聚焦脉冲(FP)技术尽管在医学破壁和食物杀菌方面为人所熟知^[13-14],但对其提高厌氧消化效率方面的研究仍较少。聚焦脉冲在水中电弧放电,可以产生冲击波、紫外线辐射以及各种自由基^[15],同时在高压条件下,细胞膜会产生电穿孔^[16],这些都可以促使污泥细胞破碎,溶出胞内有机物。研究^[17-20]表明:①当采用较弱的电场时,可使细胞膜形成可逆电击穿,即电场所诱导的细胞膜电穿孔在一定条件下可以重新封闭;②随着电场强度的增大,细胞膜孔数增多,孔径增大,当达到一定程度后膜孔就不能再封闭,从而造成不可逆击穿,使细胞死亡、破裂。在污泥预处理中,主要是运用电场对细胞膜不可逆击穿原理。20 世纪 60 年代后期, Sale 等^[21-22]首次采用多个高压电脉冲对微生物细胞进行处理,发现细胞在电场作用下溶解或死亡。聚焦脉冲电穿孔机理见图 1^[23]。图 1 中,正负电极分别与聚焦脉冲电源和地面连接,绝缘的细胞膜在快速变化的电场中发生极化。这是由于磷脂分子是极性分子,随着电荷的积累,膜间电压升高。如果膜间电压超过了某一阈值,细胞膜间由于引力引起的压力就会破坏磷脂双分子层而形成小孔。

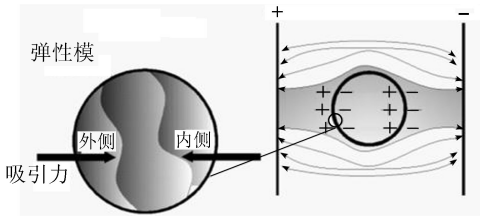


图 1 聚焦脉冲电穿孔机理示意图

细胞电穿孔机理主要研究电脉冲的幅度、宽度、波形以及个数等参数对细胞膜通透性变化的影响。脉冲宽度与幅度之间存在互补关系,即降低脉冲幅度,就需要加宽脉冲时程来弥补。细胞穿孔的效率往往与脉冲幅度与宽度的乘积成正比^[24]。在细胞穿孔的大多数试验中,使用 DC 方波脉冲^[25]和 RC 指数衰减形脉冲^[26]的研究表明,如果脉冲在峰电压击穿细胞之后,能以较低的电压维持膜孔洞开放一段时间,则有利于提高细胞电穿孔的效率,因此,RC 指数衰减形脉冲往往比相同的 DC 方波脉冲更有效^[27]。增加脉冲个数能增大细胞穿孔的效果,后续

脉冲的积累成活率比第一脉冲下降得更快^[28]。聚焦脉冲预处理污泥能够有效提高污泥溶解性有机物浓度和污泥厌氧消化产甲烷效率,并且具有较高的能效。聚焦脉冲对污泥处理强度的计算公式为

$$T_1=K\frac{V^2DfeH_{RT}}{L^2}\tag{1}$$

式中: T_1 为聚焦脉冲对污泥的处理强度, $(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{m}^3$; V 为脉冲电压, $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)/(\text{C}\cdot\text{s}^2)$; D 为脉冲宽度,s; f 为脉冲频率,1/s; e 为样品的电导率,S/m; L 为电极间的距离,m; H_{RT} 为污泥样品在脉冲电场中停留的时间,s; K 为单位转换常数,用来评估污泥处理强度对 COD 生成 CH_4 的影响,取 $2.8\times10^{-7}(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{J}$ 。

Hanna 等^[30]利用聚焦脉冲处理剩余污泥后,发现 SCOD/TCOD 以及污泥中胞外多聚物 ECP 成分的含量分别增加了 4.5 倍和 6.6 倍。厌氧消化后,甲烷产量提高了 2.5 倍。美国 OpenCEL™ 产品已经在梅萨市西北污水处理厂中得到应用^[31],经处理后的剩余污泥中,溶解性化学需氧量 SCOD 以及溶解性有机碳 DOC 分别增加了 160% 和 120%。当剩余污泥处理率为 60% 时,甲烷产量增加了 40% 以上。经计算,聚焦脉冲预处理所提高的产甲烷量与回收的热能之和达到了聚焦脉冲预处理所消耗能量的 18 倍。即使不考虑回收的热能,污泥产甲烷量的增量也达到输入能量的 2.7 倍。聚焦脉冲预处理运行数据显示,设备安装投资成本回收期不会超过 3 年。

聚焦脉冲技术不但明显地提高了污泥厌氧消化效率,而且减少了厌氧消化过程中的臭味和泡沫等,因此可能在污水处理厂中能得到广泛应用。今后聚焦脉冲技术的研究方向在以下几个方面:①改变脉冲的形式,如使用振荡电场,使除了具有压缩磷脂双分子层的效果之外,还会产生电-机械力耦联效应^[32],可能会提高污泥处理的效果;②联合其他预处理工艺,提高污泥处理能力;③改善脉冲电场处理室的材料和构造,因为在脉冲处理过程中,处理室会受到很大的腐蚀^[33];④增加污泥处理量,因为所使用的电压应可以产生几个 kV/cm 的强电场,而限制了污泥处理室的容积。

1.2 微波预处理技术

微波是一种频率从 300 MHz ~ 300 GHz,即波长在 1 m ~ 0.1 mm 范围的电磁波^[34]。目前用于工业目的的微波频率一般为 915 MHz 和 2 450 MHz。微波对微生物的作用可分为热效应和非热效应两种。微波热效应主要有偶极极化损耗、界面极化损耗等机制^[35-36],而对非热效应原理至今还具有很大的争议。

目前,微波污泥预处理技术的研究较为热门。

Cigdem 等^[37]认为,虽然污泥处理的前 7 d 微波对产气影响不大,但明显提高了污泥厌氧消化的性能。Eskicioglu 等^[38]的研究表明,微波对污泥絮体的结构和细胞膜具有破坏能力,使污泥释放胞内外溶解性颗粒 COD 有机物质(如蛋白质,多糖,核酸等)。在 96℃ 温度下,当污泥停留时间为 5 d 时,污泥中总固体 TS 和挥发性固体 VS 的去除率比常温下处理的去除率提高了 32% 和 26%;而当污泥停留时间为 20 d 时,同样操作条件下 TS 和 VS 去除率提高了 16% 和 12%,说明温度和污泥停留时间对微波提高污泥厌氧性都具有影响。Park 等^[39]发现经微波处理后的剩余污泥中,产气量和 COD 去除率分别提高了 79% 和 65%,同时,污泥停留时间可由原来的 15 d 缩短至 8 d。Eskicioglu 等^[40]通过实验发现温度、处理强度以及污泥浓度对污泥溶解性的影响较大。

微波预处理技术处理速度快、效果好,可有效溶解污泥细胞壁,提高厌氧消化效率,但运行费用较高,限制了其广泛应用。今后应以降低能耗为着手点,研究影响微波处理效率的因素,找出最佳工况,并联合其他处理工艺,进一步提高厌氧消化效果,降低能耗。微波应用前景较好,值得进一步研究,并推动其在工程上的广泛应用。

2 污泥辐射预处理技术

辐射技术用于废物处理最早始于 20 世纪 50 年代^[41]。目前辐射类型主要有两种:①由同位素⁶⁰Co 及¹³⁷Cs 作为辐照源产生 γ 射线;②利用电子加速器加速出来的高能电子束。基于辐射的污泥处理技术具有操作简便、高效率、低能耗等特点,因此应加以提倡和推广^[42]。

2.1 γ 射线预处理法

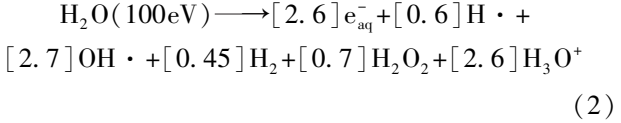
⁶⁰Co 和¹³⁷Cs 都能有效地产生 γ 射线进行污泥处理,但在工业上普遍使用⁶⁰Co,这是因为¹³⁷Cs 半衰期为 30 年,有可能会引起核泄漏^[43]。ČUBA 等^[44]的实验表明,经 γ 射线(16 kGy)处理后的污泥产气量提高了 22%。文献^[45]发现 γ 射线还可以提高污泥的沉降性、脱水性,能抑制污泥发泡。YUAN 等^[46]通过实验发现,污泥经过 γ 射线处理后,总固体 TS、挥发性固体 VS、悬浮物 SS 以及挥发性悬浮物 VSS 都在减少,而且随着辐射剂量从 0 增加到 30 kGy 时,污泥粒径分布从 80 ~ 100 μm 降低到 0 ~ 40 μm,这表明污泥絮体受到破坏。由于污泥细胞溶出胞内物质,SCOD 升高。辐射剂量分别为 2.48 kGy,6.51 kGy 和 11.24 kGy 处理过的污泥,产气量分别增加了 44%,98% 和 178%。郑正等^[47]的实验

表明,在较低辐射剂量(2.48 kGy)下,SCOD 增加了 178.7%;当辐射剂量增至 10 ~ 20 kGy 时,SCOD 的增加率超过 500%。经 10 kGy 辐射剂量处理后的污泥产气比率有显著提高。当污泥停留时间为 8 d,12 d 和 20 d 时,污泥产气比率分别增加了 52.6%,53.5% 和 37.6%。牟艳艳等^[48]研究发现,γ 射线辐照预处理方法可有效改善厌氧消化污泥的物化性质:①可降低污泥中有机质颗粒的大小,增加细菌胞外酶接触底物的几率,从而提高厌氧消化的水解速率;②破坏污泥中微生物的细胞壁,提高污泥厌氧消化的有效成分;③提高污泥厌氧消化系统的抗酸性能;④γ 射线与水分子发生反应生成活性物质 e_{aq}^- 、 $OH \cdot$ 、 $H \cdot$,提高污泥厌氧消化的速率。

可见,γ 射线预处理法可有效进行污泥破壁,提高厌氧消化速率。但关于 γ 射线污泥预处理法的研究相当少,今后研究的方向将是:①降低 γ 射线预处理法装置的基建费用;②研究影响 γ 射线预处理法污泥处理效果的因素,如辐射剂量、辐射时间、污泥温度、污泥含水率以及污泥层厚度等,进而优化运行参数,提高污泥处理效率;③研究和其他预处理技术(如加碱等)相结合的污泥处理方法;④提高 γ 射线预处理法的安全性以及 γ 射线产生量。

2.2 电子束预处理技术

电子束预处理技术不需要添加额外的化学试剂,不生成副产物,并且可以通过由辐射产生的 $OH \cdot$ 来降解有毒难处理的物质^[49]。当高能电子束辐射纯水时,在 10^{-7} s 内发生化学反应^[50]:



方括号中的数字表示每吸收 100eV 的能量时,水中产生的各种自由基的数量。这个反应也可以在污泥中发生,因为污泥中含有大量的水。Park 等^[51]通过实验发现,在辐照剂量为 20 kGy 下,污泥层厚度为 1.0 cm,0.75 cm,0.5 cm 以及 0.25 cm 中的 SCOD 分别增加了 49%,54%,97% 和 147%,并且发现辐照时间从 0.3 s 增加到 1.2 s 过程中,SCOD 增加量并不明显,但是蛋白质含量增加了 5 倍,从而得出结论:污泥层厚度是影响污泥中有机物溶解的重要参数,辐照时间是影响污泥细胞溶胞的重要参数。SHIN 等^[52]实验发现,电子束辐射处理污泥后的 24 h 期间,总化学需氧量 TCOD 释放了 30% ~ 52%,挥发性脂肪酸 VFAs 大约增加了 90%,并且厌氧消化时间缩短了一半。此外实验还发现,污泥的 pH 值不影响电子束污泥处理效果,在 SCOD 增加较快的期间,氧化还原电位(oxidation-reduction

potential, ORP) 曲线下降, 而当 SCOD 曲线趋于平衡时, ORP 曲线开始上升, 由此可将 ORP 作为一个快速表征污泥水解的参数。CAO 等^[53] 的实验发现, 随着辐射剂量的增大, SCOD、溶解性总氮 STN 等迅速增加, 而混合液污泥浓度 MLSS 大幅度减小, 说明此时污泥细胞破解溶出大量细胞内物质; 并且当污泥层为 5 cm 时处理效果较好, 处理后的污泥 zeta 电位趋近于零, 说明污泥的沉降性能变好。

电子束污泥预处理技术具有高效、快速、经济的优点, 应用前景较好。今后的研究方向应在于: ①确定影响电子束预处理技术的因素, 优化工况参数; ②与其他预处理技术联用, 提高污泥处理效果; ③提高电子束预处理技术的安全性。

3 污泥生物水解预处理技术

采用生物技术处理污泥, 由于具有可持续性、无害化、安全以及对环境友好等优点, 得到了许多研究者的青睐。目前, 生物水解预处理技术主要包括生物酶预处理技术和生物强化预处理技术。随着生物技术的迅速发展, 生物水解预处理技术具有较好的发展前景。

3.1 生物酶预处理技术

生物酶水解技术已经有了 30 多年的研究历史, 许多种类的酶在废物处理当中起着重要的作用。先前的研究表明, 额外添加酶类可以提高污泥厌氧消化效率, 并可改善酶类的沉降性能^[54], 降低处理成本^[55], 控制简单, 产物对环境无害^[56]。Guang 等^[57] 将胞外聚合物 (EPS) 分成松散 (LB-EPS) 和紧密 (TB-EPS) 两部分, 并根据酶系列实验研究结果, 认为蛋白酶主要作用于污泥颗粒, α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶作用于松散的胞外聚合物 (LB-EPS), 只有很少部分的蛋白酶、 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶作用在紧密的胞外聚合物 (TB-EPS)。44% ~ 65% 的 α -淀粉酶和 59% ~ 100% 的 α -葡萄糖苷酶作用在 LB-EPS, 表明污泥絮体水解部分主要是蛋白质和碳水化合物。Roman 等^[58] 将纤维素酶和链霉菌蛋白酶 E 分单一和混合两种投加方式来处理污泥, 结果表明, 经混合投加方式处理后的污泥, 污泥量减少了 80%, 颗粒型 COD 去除了 93%, 总化学需氧量 TCOD 去除了 97%, 总悬浮固体 TSS 从 25 g/L 降低到 5g/L, 减少了 80%。而单一投加方式对污泥的溶解、COD 以及 TSS 却几乎没有影响, 但所有方式的投加酶都可以降低挥发性脂肪酸 VFAs。由于 VFAs 积累可能会导致发酵失败, 所以得出结论是额外添加酶可从降低 VFAs, 污泥减量, 以及由于 pH 值稳定而保证消化稳定等方面, 说明可以提高厌氧消化效率。

Andres 等^[59] 的实验表明, 污泥被生物酶处理后, 其在脉冲电场中停留的时间缩短了 30%, 这意味着反应器容积可以大大减小, 不仅降低加热和搅拌的能耗, 而且还可以降低基建的费用。

生物酶预处理技术可有效提高污泥溶解性以及厌氧消化效率, 大大提高产甲烷能力, 不需要特殊的反应设备, 反应条件温和, 不产生 2 次污染物, 所以具有良好的应用前景。由于酶的种类繁多及其本身特性, 今后研究方向应包含: ①研究利用不同种类的酶进行污泥预处理, 寻找其最佳组合; ②由于酶类对环境较敏感, 所以要研究最佳的工况参数 (如 pH、温度等) 和最佳投加量; ③提高生物工程技术, 生产低廉高效生物酶试剂。

3.2 生物强化预处理技术

生物强化预处理是向污泥中投加具有特定功能的微生物来改善污泥厌氧消化性能, 充分发挥微生物的潜力。微生物可以改变或者破坏污泥絮体的结构和成分。研究发现, 丝状真菌具有很强的释放蛋白质、酶、有机酸以及其他代谢产物的能力^[60], 可以抑制或减少碱性物质以保持 pH 平衡, 降解有机物。根据 Molla 等^[61] 的研究, 混入丝状真菌可以通过加强其他菌分泌酶的能力来加快基质的分解。通过生物强化后, 沼气产量会大大提高。Miah 等^[62] 通过接种高温消化菌种 AT, 沼气产量增加了 2.2 倍。Tepe 等^[63] 通过向厌氧发酵池中投加杆菌、假单胞菌以及放线菌等来提高产甲烷量, 当加入细菌量为 5 g/L 时, 纯甲烷产量提高了 29%, 丙酸残留浓度降低了 46%, 此外, CH_3SH 生成量降低了 63%, 大大减少了发酵过程中的臭味。Miah 等^[64] 利用菌种 SPT2-1 进行污泥预处理, 此菌种可以分泌蛋白酶以及蛋白酶等胞外酶, 在有氧条件下使污泥溶解速度加快了大约 40%, 而在厌氧条件下生物沼气产量提高了 1.5 倍。

从已有的研究成果发现, 生物强化技术在一定程度上和酶强化技术重合, 只是生物酶的来源不同。两种处理技术的优点基本一样, 有较好的发展前景。今后研究方向应为: ①由于菌种繁多, 应明确起主要作用的是哪一种或者哪一类菌种; ②确定最优化的菌种剂量, 提高经济性; ③利用生物工程技术, 培养出高效的菌种试剂。

4 结 语

虽然现有的污泥预处理技术种类繁多, 但实际应用方面的研究不够深入和全面。今后, 研究工作应该着眼于实际生产, 解决相关技术投资高、能耗大以及不经济等问题。本文笔者所论述的污泥预处理技术,

都有良好的发展应用发展空间,值得深入研究。

参考文献:

- [1] 卓英莲,周兴求. 污泥接种量对剩余污泥水解酸化的影响研究[J]. 中国给水排水,2009,25(23): 34-37. (ZHUO Yinglian, ZHOU Xingqiu. Effect of inoculated sludge quantity on hydrolysis and acidification[J]. China Water & Waste Water, 2009, 25(23): 34-37. (in Chinese))
- [2] 张义安,高定,陈同斌,等. 城市污泥不同处理处置方式的成本和效益分析:以北京市为例[J]. 生态环境,2006,15(2): 234-238. (ZHANG Yian, GAO Ding, CHEN Tongbin, et al. Economical evaluation of different techniques to treatment and dispose sewage sludge in Beijing[J]. Ecology and Environment,2006,15(2): 234-238. (in Chinese))
- [3] MA H, ZHANG S, LU X, et al. Excess sludge reduction using pilot-scale lysis-cryptic growth system integrated ultrasonic/alkaline disintegration and hydrolysis/acidogenesis pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2012,116: 441-447.
- [4] ESKICIOGLU C, PROROT A, MARIN J, et al. Synergetic pretreatment of sewage sludge by microwave irradiation in presence of H_2O_2 for enhanced anaerobic digestion[J]. Water Research,2008,42(18): 4674-4682.
- [5] APPELS L, BAEYENS J, DEGRÈVE J, et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008,34(6): 755-781.
- [6] EASTMAN J A, FERGUSON J F. Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion[J]. Journal Water Pollution Control Federation,1981,53: 352-366.
- [7] CHOI H B, HWANG K Y, SHIN B B. Effects on anaerobic digestion of sewage sludge pretreatment[J]. Water Science and Technology,1997,35(10): 207-211.
- [8] CLIMENT M, FERRER I, BAEZA M M, et al. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions[J]. Chemical Engineering Journal,2007,133(1): 335-342.
- [9] NISHOUQING NI Jianyuan, YANG Ning, et al. Effect of magnetic nanoparticles on the performance of activated sludge treatment system[J]. Bioresource Technology, 2013,143:555-561.
- [10] 李帅,边炳鑫. 磁场对污泥脱水性能影响研究[J]. 环境保护科学,2007,33(1): 12-14. (LI Shuai, BIAN Bingxin. Study on effect of magnetic treatment on sludge dewater ability[J]. Environmental Protection Science, 2007,33(1): 12-14. (in Chinese))
- [11] 李帅,边炳鑫,周正. 磁场对活性污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学研究,2007,20(3): 119-123. (LI Shuai, BIAN Bingxin, ZHOU Zheng. Study on effect of magnetic treatment on sludge dewatering ability[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(3): 119-123. (in Chinese))
- [12] 杨巧绒,高梦祥,马海乐. 强脉冲磁场的杀菌效果及对食品品质的影响[J]. 微波学报,2004,20(3): 82-85. (YANG Qiaorong, GAO Mengxiang, MA Haile, et al. Sterilization effect of pulsed magnetic field and its influence on food quality[J]. Journal of Microwaves, 2004,20(3): 82-85. (in Chinese))
- [13] MIZUNO A, HORI Y. Destruction of living cells by pulsed high-voltage application[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1988,14(3):387-394.
- [14] DEVLIEGHERE F, VERMEIREN L, DEBEVERE J. New preservation technologies: possibilities and limitations[J]. International Dairy Journal,2004,14(4): 273-285.
- [15] ŠUNKA P. Pulse electrical discharges in water and their applications[J]. Physics of Plasmas,2001,8(5):2587-2594.
- [16] RITTMANN B E, LEE H S, ZHANG H, et al. Full-scale application of focused-pulsed pre-treatment for improving biosolids digestion and conversion to methane[J]. Water Sci Technol,2008,58(10): 1895-1901.
- [17] NEUMANN E, ROSENHECK K. Permeability changes induced by electric impulses in vesicular membranes[J]. Journal of Membrane Biology,1972,10(1): 279-290.
- [18] NEUMANN E, ROSENHECK K. Potential difference across vesicular membranes[J]. J Membr Biol,1973,14: 194-196.
- [19] COSTER H G L, ZIMMERMANN U. Dielectric breakdown in the membranes of *Valonia utricularis*. The role of energy dissipation[J]. Biochimica et Biophysica Acta,1975,382(3): 410-418.
- [20] KINOSITA K, TSONG T Y. Survival of sucrose-loaded erythrocytes in the circulation[J]. Nature,1978,272: 258-260.
- [21] SALE A J H, HAMILTON W A. Effects of high electric fields on microorganisms: I. killing of bacteria and yeasts[J]. Biochimica et Biophysica Acta,1967,148(3): 781-788.
- [22] SALE A J H, HAMILTON W A. Effects of high electric fields on micro-organisms: III. Lysis of erythrocytes and protoplasts[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1968, 163: 37-43.
- [23] KOPLOW O, BARJENBRUCH M, HEINZ V. Sludge pre-treatment with pulsed electric fields[J]. Water Science & Technology,2004,49(10): 123-129.
- [24] CHANG D C, SAUNDERS, J A, SOWERS A E. Guide to electroporation and electrofusion[M]. Salt Lake City: Academic Press Inc.,1992.

- [25] KINOSITA K, TSONG T Y. Formation and resealing of pores of controlled sizes in human erythrocyte membrane [J]. *Nature*, 1977, 268: 438-441.
- [26] SOWERS A E. Characterization of electric field-induced fusion in erythrocyte ghost membranes [J]. *Journal of Cell Biology*, 1984, 99(6): 1989-1996.
- [27] CHANG D C, CHASSY B M, SAUNDERS J A, et al. Guide to electroporation and electrofusion [M]. Salt Lake City: Academic Press Inc., 1992.
- [28] 汪和睦, 鲁玉瓦, 谢廷栋, 等. 细胞的电融合: 一种改进的平行多电极系统 [J]. *科学通报*, 1987(13): 1032-1035. (WANG Hemu, LU Yuwa, XIE Tingdong, et al. Cell electrofusion: an improved parallel multi electrode system [J]. *Science Bulletin*, 1987(13): 1032-1035. (in Chinese))
- [29] SALERNO M B, LEE H S, PARAMESWARAN P, et al. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis [J]. *Water Environment Research*, 2009, 81(8): 831-839.
- [30] CHOI H, JEONG S W, CHUNG Y. Enhanced anaerobic gas production of waste activated sludge pretreated by pulse power technique [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(2): 198-203.
- [31] RITTMANN B E, LEE H S, ZHANG H, et al. Full-scale application of focused-pulsed pre-treatment for improving biosolids digestion and conversion to methane [J]. *Water Science and Technology*, 2008, 58(10): 1895-1901.
- [32] CHANG D C. Cell poration and cell fusion using an oscillating electric field [J]. *Biophysical Journal*, 1989, 56(4): 641-652.
- [33] QIN B, ZHANG Q, BARBOSA-CÁNOVAS G V, et al. Pulsed electric field treatment chamber design for liquid food pasteurization using a finite element method [J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(2): 557-565.
- [34] 赵春晖, 张朝柱. 微波技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [35] 王剑虹, 严莲荷, 周申范, 等. 微波技术在环境保护领域中的应用 [J]. *工业水处理*, 2003, 23(4): 18-22. (WANG Jianhong, YAN Lianhe, ZHOU Shenfan, et al. Application of the micro wave technology to the environmental protection [J]. *Industrial Water Treatment*, 2003, 23(4): 18-22. (in Chinese))
- [36] WHITTAKER A G, MINGOS D M P. The application of microwave heating to chemical syntheses [J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1994, 29(4): 195-220.
- [37] 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.
- [38] ESKICIOGLU C, DROSTE R L, KENNEDY K J. Performance of continuous flow anaerobic sludge digesters after microwave pretreatment [C]//Proceedings of WEFTEC. Alexandria: Water Environment Federation, 2006: 526-540.
- [39] PARK B, AHN J H, KIM J, et al. Use of microwave pretreatment for enhanced anaerobiosis of secondary sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50(9): 17-23.
- [40] ESKICIOGLU C, KENNEDY K J, DROSTE R L. Initial examination of microwave pretreatment on primary, secondary and mixed sludges before and after anaerobic digestion [J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57(3): 311-317.
- [41] BORRELY S I, CRUZ A C, DEL MASTRO N L, et al. Radiation processing of sewage and sludge: a review [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 1998, 33(1): 3-21.
- [42] 牟艳艳. γ 射线辐照预处理对污泥厌氧消化性质的影响及其机理研究 [D]. 南京: 南京大学, 2005.
- [43] WANG J. Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1): 2-7.
- [44] ČUBA V, POSPÍŠIL M, MŮČKA V, et al. Electron beam/biological processing of anaerobic and aerobic sludge [J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2003, 53(1): 369-374.
- [45] LAFITTE-TROUQUE S, FORSTER C F. The use of ultrasound and γ -irradiation as pre-treatments for the anaerobic digestion of waste activated sludge at mesophilic and thermophilic temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2002, 84(2): 113-118.
- [46] YUAN S, ZHENG Z, MU Y, et al. Use of gamma-irradiation pretreatment for enhancement of anaerobic digestibility of sewage sludge [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2008, 2(2): 247-250.
- [47] 郑正, 袁守军, 张继彪, 等. γ 射线辐照预处理加速污泥厌氧消化 [J]. *环境化学*, 2006, 25(3): 297-300. (ZHENG Zheng, YUAN Shoujun, ZHANG Jibiao, et al. Acceleration the speed of sewage sludge anaerobic digestion by γ -irradiation pretreatment [J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 25(3): 297-300. (in Chinese))
- [48] 牟艳艳, 袁守军, 崔磊, 等. γ 射线预处理对改善污泥厌氧消化特性的影响研究 [J]. *核技术*, 2005, 28(10): 751-754. (MOU Yanyan, YUAN Shoujun, CUI Lei, et al. Effect of gamma-irradiation pretreatment on improvement of anaerobic digestive characteristic of sludge [J]. *Nuclear Techniques*, 2005, 28(10): 751-754.)
- [49] KIM T H, LEE J K, LEE M J. Biodegradability enhancement of textile wastewater by electron beam irradiation [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2007, 76(6): 1037-1041.
- [50] HYUN S H, YOUNG J C, KIM I S. Inhibition kinetics for

- propionate degradation using propionate enriched mixed cultures [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 38 (8): 443-451.
- [51] PARK W, HWANG M H, KIM T H, et al. Enhancement in characteristics of sewage sludge and anaerobic treatability by electron beam pre-treatment [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2009, 78 (2): 124-129.
- [52] SHIN K S, KANG H. Electron beam pretreatment of sewage sludge before anaerobic digestion [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2003, 109 (1/3): 227-239.
- [53] CAO C S, WANG M. Treatment of municipal sewage sludge by electron beam irradiation [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2012, 23 (1): 29-33.
- [54] WAWRZYŃCZYK J, RECKTENWALD M, NORRLÖW O, et al. The function of cation-binding agents in the enzymatic treatment of municipal sludge [J]. *Water Research*, 2008, 42 (6): 1555-1562.
- [55] BEIJER R. Enzymatic treatment of wastewater sludge in presence of a cation binding agent: improved solubilisation and increased methane production [D]. Linköping: Linköping University, 2008.
- [56] AHUJA S K, FERREIRA G M, MOREIRA A R. Utilization of enzymes for environmental applications [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2004, 24 (2/3): 125-154.
- [57] YU G H, HE P J, SHAO L M, et al. Enzyme activities in activated sludge flocs [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, 77 (3): 605-612.
- [58] ROMAN H J, BURGESS J E, PLETSCHEKE B I. Enzyme treatment to decrease solids and improve digestion of primary sewage sludge [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2006, 5 (10): 963-967.
- [59] DONOSO-BRAVO A, FDZ-POLANCO M. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and grease trap: assessment of enzyme addition [J]. *Process Biochemistry*, 2013, 48: 936.
- [60] COULIBALY L, GOURENE G, AGATHOS N S. Utilization of fungi for biotreatment of raw wastewaters [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2004, 2 (12): 620-630.
- [61] MOLLA A H, FAKHRU'L-RAZI A, ABD-AZIZ S, et al. In-vitro compatibility evaluation of fungal mixed culture for bioconversion of domestic wastewater sludge [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2001, 17 (9): 849-856.
- [62] MIAH M S, TADA C, YANG Y, et al. Aerobic thermophilic bacteria enhance biogas production [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2005, 7 (1): 48-54.
- [63] TEPE N, YURTSEVER D, MEHTA R J, et al. Odor control during post-digestion processing of biosolids through bioaugmentation of anaerobic digestion [J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57 (4): 589-594.
- [64] MIAH M S, TADA C, YANG Y, et al. Aerobic thermophilic bacteria enhance biogas production [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2005, 7 (1): 48-54.

(收稿日期: 2013-10-05 编辑: 彭桃英)

(上接第 29 页)

- [21] LIMA A, CICCHELLA D, FRANZIA S D. Natural contribution of harmful elements in thermal groundwaters of Ischia Island (Southern Italy) [J]. *Environmental Geology*, 2003, 43 (8): 930-940.
- [22] HIRNER A V, FELDMANN J, KRUPP E, et al. Metal (loid) organic compounds in geothermal gases and waters [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29 (5/7): 1765-1778.
- [23] 张知非, 朱梅湘, 刘时彬, 等. 西藏水热地球化学的初步研究 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 1982 (3): 88-96. (ZHANG Zhifei, ZHU Meixiang, LIU Shibin, et al. Preliminary studies of hydrothermal geochemistry of Xizang [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1982 (3): 88-96. (in Chinese))
- [24] LI S H, WANG M G, YANG Q, et al. Enrichment of arsenic in surface water, stream sediments and soils in Tibet [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 135: 104-116.
- [25] 佟伟, 章铭陶, 张知非, 等. 西藏地热 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [26] 鲁连仲. 西藏地热活动的地质背景分析 [J]. *地球科学*, 1989 (增刊 1): 53-59. (LU Lianzhong. Analysis on the geological background of geothermal activities in Tibet [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1989 (Supl): 53-59. (in Chinese))
- [27] LI H X, HE X R, HU X C, et al. Environmental issues of geothermal development in Yangbajing, Tibet and the countermeasures [J]. *Wuhan University Journal of Natural Science*, 2003, 8: 965-974.
- [28] 郭清海, 叶露, 魏晓阳, 等. 富砷地热废水排放的水环境效应: 以西藏羊八井热田为例 [J]. *环境科学与技术*, 2009, 9 (32): 116-119. (GUO Qinghai, YE Lu, WEI Xiaoyang, et al. Water-environment effects induced by discharging geothermal wastewater with high As level: a case study at Yangbajing in Tibet [J]. *Environment Science & Technology*, 2009, 9 (32): 116-119. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-01-16 编辑: 高渭文)