

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.06.017

污泥预处理技术的研究现状与前景

宋秀兰,周美娜

(太原理工大学环境科学与工程学院,山西 太原 030024)

摘要 介绍当前研究和应用较多的污泥预处理技术。重点对臭氧预处理技术、碱解预处理技术、热预处理技术、微波预处理技术、超声波预处理技术、生物预处理技术和一些联合预处理技术的原理和应用进行了综述,并论述了各种预处理技术的处理效果、影响因素、优缺点及应用前景。指出对于不同预处理技术进行优化组合,能够取得更为显著的效果。

关键词 污泥处理 预处理技术 融胞 综述

中图分类号 X705 **文献标识码** B **文章编号** :1004-6933(2011)06-0070-05

Research progress and prospect of sludge pretreatment technology

SONG Xiu-lan,ZHOU Mei-na

(College of Environmental Science and Engineering,Taiyuan University of Technology,Taiyuan 030024,China)

Abstract :The currently studied and commonly used sludge pretreatment methods are introduced in this paper. The theoretical principles and applications of the ozone pretreatment,alkali pretreatment,thermal pretreatment,microwave pretreatment,ultrasonic pretreatment,and biological pretreatment technologies,as well as some combined pretreatment technologies are reviewed. The effects,influencing factors,advantages and disadvantages,and application prospects of these pretreatment technologies are described. It is pointed out that the optimal combination of different pretreatment technologies can produce more significant results.

Key words :sludge treatment ;pretreatment technology ;lysis ;review

随着水处理工程的增加,大量增长的污泥已成为严重的环境和安全问题,污泥中的有毒有害物质,以及由此产生的臭气和有机污染已经成为城市环境卫生的一大公害^[1]。在污泥处理过程中,污泥微生物细胞内含物的释放是重要步骤^[2]。为了提高污泥中有机质的融出率,缩短污泥水解时间,污泥预处理技术已成为国内外研究的热点。污泥预处理的目的是破坏污泥的结构及细性物质使其为易降解的物质,这样不仅能够促进系统微生物的隐性生长而减少污泥产量,而且也可将胞内释放出的有机物作为碳源加以利用,改善脱氮除磷的效果,实现污泥的减量化与资源化。

1 臭氧预处理技术

臭氧是一种强氧化剂,能与污泥中的细菌进行反应,破坏细胞壁、释放出细胞内的细胞质并继续将大分子有机物降解为小分子,提高后续系统的生物降解性能,回流进入曝气池还可以作为碳源,从而提高生物脱氮的效能^[3]。

利用臭氧氧化技术进行污泥预处理始于 20 世纪 90 年代初的日本,随后各国学者相继对此展开了相关研究。如 Saktaywin^[4]、Dogruel^[5]、Boehler^[6]等学者先后研究不同臭氧投加量下污泥中无机物的累积、有机组分、氮和磷的溶出等。但从研究中发现,各学者研究的臭氧投加量相差较大,从 1g 悬浮物(SS)投加 4mg 臭氧到 1.2g 臭氧不等。

基金项目 山西省高等学校科技项目(20081007)

作者简介 宋秀兰(1967—),女,山西定襄人,副教授,博士,主要研究方向为水污染控制。E-mail :xslsong123@163.com

王兴华等^[7]采用臭氧氧化法对活性污泥进行预处理,经 1g 挥发性固体(VS)投加 0.25 g 臭氧处理后的污泥总化学需氧量质量浓度(TCOD)降低了 1 800 mg/L,溶解性化学需氧量质量浓度(SCOD)上升了 400 mg/L,VS 平均上升了 20%,总固体量(TS)平均降低了 2.5%,产气量较未处理前增加了 250%,认为该投加量为最佳预处理工艺。吴声东等^[8]利用臭氧对污泥进行氧化破解实验,考察 SCOD 的溶出量(Δ SCOD)与臭氧浓度和作用时间的关系。结果表明 Δ SCOD 随臭氧作用时间、臭氧浓度的增加而增加,在臭氧质量浓度为 40.25 mg/L 时, ρ (SCOD)从开始的 7.0 mg/L 增加至 306.7 mg/L,大约增加了 43 倍;但在一定臭氧浓度下, Δ SCOD 随作用时间延长呈线性增长趋势。曹艳晓等^[9]用臭氧氧化剩余污泥,并结合实际情况,对某污水处理厂污泥进行了不同污泥浓度下的减量试验,得出在一定污泥浓度下,臭氧投加适量即可,过多的投量反而带来不利影响。而且污泥浓度越高,污泥削减量越多;但是当混合液悬浮固体浓度(MLSS)高于某一浓度值,臭氧氧化不能实现污泥减量的需求,MLSS 削减率反而下降。针对该种污泥 w (MLSS) = 8.287 kg/m³,臭氧最佳投加量在 1g MLSS 投加 0.038 g 左右。另外臭氧预处理能大大降低污泥的生物活性,降低重金属在污泥与上清液之间的分配系数,但并不会改变污泥粒径分布^[10]。

臭氧氧化以其高效、简单易行、无二次污染而备受关注。今后需要进一步的研究方向:①继续研究其机理并依据其进一步提高臭氧氧化技术的效率,探讨这种技术的影响条件及适用范围并获得最佳操作参数;②进一步扩大研究范围,结合工程实际,将这一极其富有潜力的技术应用于工程实际中。

2 碱解预处理技术

碱处理中主要起作用的是 OH⁻。OH⁻除了能破坏污泥的絮体结构外,还可以在一定的温度下,水解、皂化细胞壁和细胞膜上的蛋白质和脂多糖,破坏微生物细胞结构,使胞内物质向浓度较低的胞外环境释放。碱解处理作为传统而又简易的处理方法有很大的潜力。

张晓等^[11]研究了不同 NaOH 投入量对污泥的破解作用,发现在 NaOH 投加量超过 1.6 g/L 后,碱投加量对污泥破解作用影响不明显;在分析投碱量为 1.6 g/L 的情况下不同 pH 值时的吸氧率(SOUR)值,通过 20 天的观察得出结论,投加碱对污泥的生物破解作用有很大的促进,且 pH 值为 7.2 时的污泥吸氧量最大。胡亚冰等^[12]认为碱预处理融胞效果随 pH 值的升高,即随着碱投加量的增加而增加。

碱解处理调节 pH 值分别为 9、10、11 的污泥进行厌氧消化 30 d,总甲烷产量与未经碱解处理的污泥相比较,总甲烷产量分别提高了 8%、23%、41%。其中经碱解处理至 pH 值为 11 时的污泥 COD 去除率为 32%。苑宏英等^[13]在温度为 20~22℃ 的条件下,研究了剩余污泥在不同 pH 条件下(4.0~11.0)厌氧发酵产酸的情况。并且发现 pH 值为 8.0~10.0 时,挥发性脂肪酸(VFAs)产量大于 pH 值为 4.0~7.0, pH 值为 10.0 时,产酸量最大为 1gVSS 产生 VFAs 256.16 mg,而且碱性条件下的 SCOD 溶出量明显高于酸性条件,表明碱性条件下可以获得更多的产酸基质。马涛等^[14]考察碱预处理对污泥粒径和产甲烷潜(BMP)的影响。结果表明,碱预处理对污泥有很好的分散作用,可以将较大粒径的污泥絮体分散为较小粒径的污泥絮体;碱预处理后污泥的产甲烷量不但明显增加,而且产甲烷所需时间也大大缩短。

加碱的预处理可以提高厌氧消化过程中污泥的水解速率改善污水污泥的消化性能。但碱处理会增加盐离子浓度以及后续处理的难度,并容易对仪器设备造成腐蚀,成本较高。此外,虽然 NaOH 的融胞效果最为理想,但是综合考虑效果以及经济因素,有研究者认为廉价并且在其他固废处理中广泛采用的石灰对污泥进行处理也是不错的选择^[15]。

3 热预处理技术

热处理是通过加热使污泥中的部分微生物细胞体受热膨胀而破裂,释放出蛋白质、矿物质以及细胞膜碎片。随温度的升高,污泥的水解速率加快和水解程度增大,低分子有机物和有机酸浓度增加。该方法是目前研究较多、应用较广的一项污泥预处理技术。

Graja 等^[16]将剩余污泥放置在 175℃ 的温度下处理 40 min,然后分析其消化产气量和脱水性能,发现无论是脱水性能还是消化产气都能够得到很好改善。王治军等^[17]研究表明,随着热水解温度的升高和热水解时间的延长,污泥固体的溶解率增大,在 210℃、75min 的热水解条件下,挥发性悬浮固体(VSS)和蛋白质的溶解率分别达到 60.02% 和 47.21%。溶解后的有机物进一步水解生成低分子物质,其中挥发性有机酸(VFA)占 SCOD 的 30%~40%,醋酸占 VFA 的 50% 以上。肖本益等^[18-19]认为,121℃ 下热处理 5 min 为最佳处理时间。在最佳条件下,热处理污泥 1gVSS 产氢达 19.57 mL。Valo 等^[20]用高温热处理剩余污泥,通过比较 SCOD 的研究中发现,热处理时间与热处理温度相比较对处理效果的影响较小。

在以后的研究中,应该在污泥热处理的机理,减少降解物质的生成和提高有机物的释放效率等方面进一步深入研究。同时,注重研究高效的污泥热处理工艺或热处理与其他处理方式的结合,开发低耗的污泥热处理方法和设备。

4 微波预处理技术

微波预处理是一种非常快速的融胞技术。污泥中的固体有机物在微波作用过程中经历溶解和水解。首先是微生物絮体的离散和解体,细胞内的有机物质被释放出来不断溶解,然后溶解性有机物不断水解。

微波预处理技术有很好的融胞效果。在一定范围内,随微波水解时间延长和水解温度升高,水解程度增大^[21]。同时污泥浓度影响微波预处理效率,乔玮等^[22]研究表明 7% 和 9% 污泥的 VSS 与 SS 溶解率比较接近,当污泥浓度增加到 13%,则水解效率显著降低。田禹等^[23]研究表明 900、720、540W 微波辐射改善污泥沉降及过滤性能的最适宜时间分别 50s、110s、130s,污泥的沉降比(SV)较原污泥相应减少 48%、38%、30%,比阻均降低了 75% 左右;真空抽滤后的含水率由原泥直接抽滤的 85% 降到 71% 左右。另外沈良等^[24]研究表明,微波处理颗粒污泥产氢的最佳预处理条件为,微波处理时间为 5min 时产气和氢气含量达到最高,分别为 1g 葡萄糖产气 59 mL 和 39.8%,分别是未处理时的 2.5 倍和 3.6 倍;出水 $\rho(\text{COD}) = 6\,605.4 \text{ mg/L}$,去除率 37.05%,有利于后续的产甲烷过程的研究。

微波技术在环境工程中的应用目前仅处于研究阶段,实际工业化应用并不广泛。但随着人们对微波技术认识的进一步深入及相关技术问题的解决和今后对低能耗、环境友好技术要求的提高,微波技术在环境污染治理工程方面必将发挥其应有作用。

5 超声波预处理技术

超声波破碎是一种破坏细胞导致细胞内物质释放的方法,其作用原理有水力作用和声化反应两方面。用超声波技术处理污泥,就是利用超声波在液体中产生的‘空穴’作用,形成极端的物理和力学条件,将污泥内微生物细胞壁击破,分解污泥絮体,使絮体尺寸变小。

Deng 等^[25]对超声波预处理的污泥进行理化性质的测定,发现污泥的沉降速度、上清液浊度、粒径分布、菌胶团结构等物理特征发生明显变化,同时 SCOD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和胞外聚合物等化学性质与未经超声波预处理的污泥也有所不同。喻艳菁

等^[26]研究了超声声能密度和超声时间对剩余污泥的粒径和溶出物溶出的影响。在脉冲比 2:1 和超声时间 10 min 的条件下,声能密度为 0.2 W/mL 时出现一个污泥粒径变化的转折点,当小于转折点时污泥粒径随声能密度增加明显下降,而当大于转折点时污泥粒径几乎不受声能密度影响。在脉冲比 2:1 和声能密度 0.8 W/mL 的条件下,超声时间 5 min 是个转折点。上清液中溶出物的浓度随超声波声能密度或超声时间的增加而增加。王晓霞等^[27]采用超声波技术研究了污泥破解过程中有机物、氮和磷的释放规律。结果表明,在声能密度为 0.167、0.330、0.500 W/mL 的条件下,污泥中的有机物、氮和磷的释放均随超声时间而增加。其中 0.500 W/mL、60 min 时 COD、TN、TP 的释放率分别达到 50.0%、48.9%、45.0%。破解后污泥释放出的有机物以分子量(MW) $\leq 2\,000$ 的物质为主,且上清液 $\rho(\text{BOD}_5)$: $\rho(\text{COD}) > 0.33$;所释放的氮以有机氮为主,其次是氨氮,污泥破解液 COD/凯氏氮的平均值为 11,适合于生物法脱氮,污泥破解所释放的正磷酸盐约占污泥总磷质量的 6.0% ~ 18.2%。童文锦等^[28]在研究中发现,在适当的声能密度和超声时间下,超声波预处理可以明显提高污泥破解率,同时提高污泥的生物活性。而 Li 等^[29]通过对不同声强的超声波在一定作用时间内吸氧率(SOUR)的测定来表示微生物活性的变化趋势,比较了 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 W/mL 5 种声能密度作用下的吸氧率,发现较低的超声波强度(0.05、0.1 W/mL)能达到更高的 SOUR 并能较长时间地维持微生物的活性。

超声波溶胞技术具有清洁、安全、低能耗等特点,使得这一技术的运行成本大大降低,是一项值得推广的新技术。尽管将超声波技术应用到实际工程中还需要一定的时间,但到目前为止,国内外已经从不同方面对超声波溶胞技术进行了大量的研究,相信超声波技术在污泥处理方向必将起到较为重要的作用。

6 生物预处理技术

新型嗜热酶溶解(solubilization by thermophilic enzyme,简称 S-TE)技术,即通过优势嗜热菌在适宜条件下分泌的活性胞外酶的生物融胞作用达到对污泥短时、高效地溶解。

史彦伟^[30]从高温好氧堆肥发酵基中筛选分离出了特性与嗜热脂肪芽孢杆菌菌株(*Bacillus stearothermophilus* sp)极为相似的嗜热菌菌株 AT06-1 和 AT06-2,并利用这两种菌株考察了不同温度和溶解氧条件下剩余污泥的溶解特征。AYOL^[31]向污泥

中投加溶菌酶使其质量浓度达到 10 mg/L,发现污泥中 TSS 占 TS 的比例较处理前的 26% 提高到 48%,而且随着溶菌酶量的增加,污泥中蛋白质和多糖浓度随之降低,说明溶菌酶能有效地溶解难以水解的高分子物质,使污泥的脱水性能和消化性能在很大程度上得以提高和加强。

尽管生物技术处理污泥的甲烷产率提高幅度相对其他预处理技术较低,但这是一项新兴的生物处理技术,目前仍处于试验研究阶段,需进一步优化和完善。由于该项技术具有经济、廉价、无二次污染的优势,已引起越来越多的关注。

7 联合预处理技术

随着对污泥预处理技术研究的不断深入,人们已经不再局限于应用一种技术来促进细胞溶解了,而是将不同的技术结合起来,相互促进,进一步提高污泥水解的速率。

7.1 热碱法

过高或者过低的 pH 值会降低微生物对高温的抵抗力,所以热碱法也可以用来进行污泥破解,其所需的反应时间比单纯加热或单纯加碱短。Vlyssides 等^[32]将饮料生产污水污泥用石灰调节 pH 值分别为 8、9、10、11,并在 50、60、70、80、90℃ 时进行热处理,在 pH 值为 11,温度为 90℃,预处理 10h 后,VSS 减少率达到 45%,同时 ρ (SCOD) 达 70 g/L,1gVSS 产甲烷 0.28 L。由此可见,热处理与碱处理联合有很好的协同效应,提高了溶胞效果的同时也改善了污泥的厌氧消化性能。

7.2 微波与其他技术的联合处理

7.2.1 微波与 H₂O₂ 联合处理

Eskicioglu 等^[33]将微波与强氧化剂 H₂O₂ 联合处理浓缩剩余污泥(TWAS),使 SCOD:TCOD 较单独微波处理有所提高,这表明两者联合具有一定的协同效应。污泥溶解比例随着污泥初始 pH 值的提高而增加。在 H₂O₂ 与 TSS 等比例投加条件下,COD 溶出与污泥浓度呈线性关系,而且对污泥中磷的释放有很大的促进作用^[34]。

7.2.2 微波与碱联合作用

添加碱辅助条件下污泥微波热水解的有机物溶解速度快,溶解率高,而且会引起污泥中碳、氮、磷的大量释放^[35]。

碱的添加量对污泥溶解率有显著影响,在 1g SS 添加 0~0.05 g NaOH 的范围内,污泥水解率随碱添加量的增加快速上升,进一步增大添加量时污泥水解率的增加缓慢。而 NaOH 添加量增加到 0.1g 时,污泥的厌氧消化性能受到抑制^[36]。在一定的碱添

加量下,污泥热水解效率受温度影响显著。在各温度下,热水解 5 min 即可获得较高的溶解率。

目前碱解多采用 NaOH,但崔金娟等^[37]研究了碳酸氢钠对微波预处理剩余污泥的促进作用,结果表明,加 NaHCO₃ 不仅能提高污泥碱度,而且 NaHCO₃ 与微波联合处理后污泥溶解性化学需氧量、挥发性脂肪酸的含量都随 NaHCO₃ 加入量的增加而大幅增大。

7.3 超声波与碱联合处理

Zawieja 等^[38]进行了超声波与碱解联合处理的研究。结果显示,污泥经超声波与 NaOH 作用,剂量为 1g VS 投加 0.1~0.6 g 联合作用后,其相应的 SCOD 浓度比未经处理污泥的初始值分别增大 26、33、43、50、53 和 54 倍,溶解性有机氮由 34% 提高到 42%,而且联合处理所需的碱投加量比单独碱解处理的投加量少。刘勇等^[39]研究表明,pH 大于 9.0 的碱性条件下,超声波辐射可降低 VSS/TSS。当 pH = 11.0,超声波辐射在 60min 以内,SCOD、溶解性磷(SP)和溶解性糖(SA)含量与时间均呈线性关系。

8 展 望

污泥预处理方法可以有效促进污泥中细胞的分解和胞内物质的释放,提高污泥的消化性能,加快消化速率,提高产气量,但各种不同的预处理技术各有利弊。如超声波能分解污泥中的细胞体,运行费用较高。加碱处理对提高污泥厌氧消化有很好的效率,但其每日产气量以及基质的去除率并未随加碱量的增加而增加,且提高厌氧消化效率有限。臭氧氧化预处理能很好地分解污泥中的细胞体,但臭氧氧化费用较高,处理成本较大。生物预处理技术属新兴的污泥预处理技术,具有较好的发展前景,是今后重点研究的方向。此外,选择不同预处理技术进行优化组合,扬长避短,往往能够取得更为显著的效果。工程应用中,应根据实际需要,选择合理的预处理技术。

参考文献：

- [1] ZHANG P Y,ZHANG G M,WANG W. Ultrasonic treatment of biological sludge :floc disintegration, cell lysis and inactivation [J]. Bioresource Technology,2007,98(1) :207-210.
- [2] 赵玉鑫,尹军,王剑寒. 臭氧破解污泥效能评价指标选择与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(8) :79-83.
- [3] 王守仁,王增长,宋秀兰. 污泥处理技术发展[J]. 水资源保护,2010,26(1) :80-83.
- [4] SAKTAYWIN W, TSUNO H, NAGARE H. Advanced sewage treatment process with excess sludge reduction and phosphorus recovery [J]. Water Research,2005,39 :902-910.

- [5] DOGRUEL S, SIEVERS M, GERMIRLI-BABUNA F. Effect of ozonation on biodegradability characteristics of surplus activated sludge[J]. Science and Engineering, 2007, 29(3) :191-199.
- [6] BÖEHLER M, SIEGRISSE H. Potential of activated sludge ozonation[J]. Wat Sci Tech, 2007, 55(12) :181-187.
- [7] 王兴华, 何若平, 吴菁蟪, 等. 臭氧在污泥预处理中的应用研究[J]. 中国沼气, 2010, 28(2) :27-29.
- [8] 吴声东, 江水英, 万金保. 污泥臭氧破解及影响因素程度分析[J]. 南昌大学学报 工科版, 2009, 31(2) :113-116.
- [9] 曹艳晓, 吴俊锋, 冯晓西. 臭氧氧化剩余污泥的影响因素分析及应用初探[J]. 给水排水, 2010, 136(1) :135-139.
- [10] ZHANG Guang-ming. Sludge ozonation :disintegration, supernatant changes and mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2009, 100 :1505-1509.
- [11] 张晓, HWANG Eung-ju, LEE Young-ok. 碱处理对废水污泥生物降解性的影响[J]. 国外丝绸, 2006(5) :13-15.
- [12] 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]. Journal of Anhui Agri Sci, 2009, 37(4) :1737-1739, 1747.
- [13] 苑宏英, 员建, 徐娟, 等. 碱性 pH 条件下增强剩余污泥厌氧产酸的研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9) :26-29.
- [14] 马涛, 于海彬, 孙茜. 碱预处理提高污泥产甲烷潜力 (BMP) 研究 [J]. 环境科学与管理, 2008, 33(1) :114-116.
- [15] LÓPEZ TORRES M, ESPINOSA LLORÉNS M. Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes [J]. Waste Management, 2008, 28(11) :2229-2234.
- [16] GRAJAS, CHAUZY J, FERNANDES P, et al. Reduction of sludge production from WWTP using thermal pretreatment and enhanced anaerobic methanisation [J]. Wat Sci Tech, 2005, 52(1/2) :267-273.
- [17] 王治军, 王伟. 剩余污泥的热水解实验 [J]. 中国环境科学, 2005, 25(增刊) :56-60.
- [18] 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.
- [19] 肖本益, 刘俊新. 污水处理厂剩余污泥热处理发酵产氢的影响因素 [J]. 过程工程学报, 2009, 9(1) :47-52.
- [20] VALO A, CARRERE H, DELGENES J P. Thermal, chemical and thermo chemical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion [J]. Chem Technol Biotechnol, 2004, 79 :1197-1203.
- [21] 乔玮, 王伟, 黎攀, 等. 城市污水污泥微波热水解特性研究 [J]. 环境科学, 2008, 29(1) :152-157.
- [22] 乔玮, 王伟, 荀锐, 等. 高固体污泥微波热水解特性变化 [J]. 环境科学, 2008, 29(6) :1611-1615.
- [23] 田禹, 方琳, 黄君礼. 微波辐射预处理对污泥结构及脱水性能的影响 [J]. 中国环境科学, 2006, 26(4) :459-463.
- [24] 沈良, 艳群, 阮文权, 等. 不同预处理方式对颗粒污泥厌氧发酵产氢性能的影响 [J]. 太阳能学报, 2009, 30(4) :532-537.
- [25] DENG J C, FENG X, LEI H Y, et al. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3) :1074-1081.
- [26] 王晓霞, 邱兆富, 范吉, 等. 超声波处理剩余污泥有机物、氮和磷的释放特性研究 [J]. 环境污染与防治, 2009, 31(3) :66-69.
- [27] 喻艳菁, 丁国际, 邱慧琴, 等. 超声处理对剩余污泥的粒径和溶出物的影响 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(4) :703-708.
- [28] 童文锦, 孙水裕, 郑莉, 等. 城市污水污泥超声波预处理的研究 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5) :134-139.
- [29] 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.
- [30] 史彦伟. S-TE 剩余污泥溶解特征研究及其资源化 [D]. 长沙 湖南大学, 2007.
- [31] AYOL A. Enzymatic treatment effects on dewaterability of anaerobically digested biosolids :performance evaluations [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(7) :2427-2434.
- [32] VLYSSIDES A G, KARLIS P K. Thermal alkaline solubilization of waste activated sludge as a pretreatment stage for anaerobic digestion [J]. Bioresource Technology, 2004, 91(2) :201-206.
- [33] ESKICIOGLU C, PROROT A, MARIN J, 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.
- [34] 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.
- [35] 程振敏, 魏源送, 刘俊新. 酸碱预处理对常压微波辐射剩余活性污泥磷释放的影响 [J]. 环境科学, 2009, 30(4) :1110-1113.
- [36] 乔玮, 王伟, 徐衣显, 等. 碱辅助条件下的污泥微波热水解特性研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(9) :2678-2683.
- [37] 崔金娟, 吴纯德, 许小洁, 等. 碳酸氢钠对微波预处理剩余污泥的促进作用研究 [J]. 水处理技术, 2009, 35(8) :66-68.
- [38] ZAWIEJAI, WOLNY L, WOLSKI P. Influence of excessive sludge conditioning on the efficiency of anaerobic stabilization process and biogas generation [J]. Desalination, 2008, 222(1/3) :374-381.
- [39] 刘勇, 郝 , 张书廷. 低强度超声波与酸、碱协同对污泥溶胞的影响 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(4) :683-688.

(收稿日期 2010-08-25 编辑 高渭文)