

污泥自热式高温好氧消化 技术研究进展

宋玉栋 胡洪营

(清华大学环境科学与工程环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084)

摘要 污泥自热式高温好氧消化 (ATAD) 具有反应速率快,停留时间短,病原微生物灭活效果好等优点,特别适合于小规模污水处理厂污泥的处理,在北美和欧洲已有较多的应用实例。系统总结了 ATAD 系统各方面的研究进展,包括 ATAD 系统中微生物的种类与特性,ATAD 污泥处理过程中微生物细胞、有机碳以及氮磷的转化规律,ATAD 反应器运行控制参数,以及改善 ATAD 处理后污泥脱水性能的方法,并介绍了基于 ATAD 技术的新型污水及污泥处理工艺研究开发现状。

关键词 自热式高温好氧消化 污泥处理 嗜热菌 胞外酶 挥发性脂肪酸 脱水性能 剩余污泥减量化技术

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1008-9241(2006)06-0013-06

Research progress on sludge autothermal thermophilic aerobic digestion technology

Song Yudong Hu Hongying

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control,
Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract As a sewage sludge stabilization technology, autothermal thermophilic aerobic digestion (ATAD) has fast reaction rate, short retention time, high disinfection capacity. ATAD becomes more attractive in sludge treatment of small-scale wastewater treatment plants, and has been widely used in Europe and North America. The microbiological aspect, matter transformation, dewaterability improvement methods and control parameters of ATAD system were well reviewed, and the transformation of the sludge microbial cells, organic carbon, nitrogen and phosphorus in the ATAD system was given more attention. The potential novel sewage and sludge treatment processes based on ATAD technology were also introduced.

Key words autothermal thermophilic aerobic digestion; sewage sludge treatment; thermophile; extracellular enzyme; volatile fatty acid; dewaterability; excess sludge reduction technology

污水处理过程中产生的污泥通常含有许多病原生物和有毒有害物质(如重金属、微量有毒有机物等)及未被稳定化的有机物等,如果不进行妥善处理与处置,将对环境造成直接或潜在的污染。

随着我国经济的发展和城市化进程的加快,尤其是小城镇的快速崛起,以及城镇污水处理率的不断提高,中小城镇污水处理厂产生的污泥量将逐渐增多。而原有的厌氧消化等技术,基建投资高,运行管理复杂,更适用于大型污水处理厂,对于小型污水处理厂,污泥处理的规模小,单位处理量的投资高。因此,迫切需要寻找适合我国中小城镇污水处理厂的污泥处理技术。

自热式高温好氧消化(autothermal thermophilic aerobic digestion, ATAD)技术是好氧消化技术的一

种,与传统好氧消化技术相比,具有反应速率快,停留时间短,对病原微生物及杂草种子灭活效果好,运行稳定,操作简单等优点,自 20 世纪 60 年代末提出以来,在北美和欧洲得到了快速的发展和应用。该技术特别适用于小规模污水处理厂污泥以及养殖场废水等高浓度液态有机废物的稳定化处理。但该技术在我国还没有应用实例,相关研究也少见报道。

1 ATAD 原理

ATAD 是一种在高温条件(45 ~ 65)下运行

资助项目:国家高技术研究发展计划“863 项目(2002AA601150)

收稿日期:2005-03-24; 修订日期:2005-09-25

作者简介:宋玉栋(1982~),男,博士研究生,主要研究方向:环境生物技术。E-mail: syd99@mails.tsinghua.edu.cn

而不需要补充热量的好氧处理工艺,主要依靠微生物在代谢过程中释放出来的热量实现工艺所需要的高温条件。在 ATAD 系统中达到并维持高温条件,需要采取以下主要措施:(1)进泥经过浓缩,使 TSS 浓度达 4%~6% (或 TVS 浓度不低于 2.5%~4%);(2)采用封闭式的反应器并在反应器外壁采取绝热措施,以减少传导性热损失;(3)采用高效供氧设备以减少蒸发热损失;(4)对于停留时间较短的情况,增加进泥与排泥的热交换^[1,2]。

2 ATAD 系统中微生物的种类与特性

ATAD 污泥处理系统中含有 2 类微生物,一类是进泥中含有的包括病原微生物在内的在处理过程中作为基质的微生物(下文称为“基质微生物”),另一类是以污泥为基质生长起来并对污泥起处理作用的微生物(下文称为“功能微生物”)。由于 ATAD 系统在高温下运行,因此功能微生物主要为能够在高温条件下存活和生长的嗜热微生物。

2.1 ATAD 系统中功能微生物的主要种类

根据目前的研究结果,不同污水处理厂的 ATAD 反应器中的嗜热菌种类可能有较大差异,但芽孢杆菌在污泥 ATAD 反应器中占非常重要的地位。

Sonnleitner 等^[3]采用分离培养的方法,研究了某污水处理厂二级消化系统(高温好氧消化中温厌氧消化串联工艺)高温好氧段的微生物群落特征,结果表明,该装置内的嗜热微生物的 95% 以上属于芽孢杆菌属,绝大部分为嗜热脂肪芽孢杆菌(*Bacillus stearothermophilus*),且绝大多数都能够分泌蛋白酶、淀粉酶等胞外酶。Hensel 等^[4]研究了以剩余污泥为基质的实验室 ATAD 反应器中的微生物种类,结果发现芽孢杆菌为优势菌属,其中数量最多(分离菌株的 55%)的菌种为 *Bacillus thermoaerophilus*,一种不属于芽孢杆菌的嗜热菌(*Sphaerobacter thermoaerophilus*)的含量次之(分离菌株的 36%),而嗜热脂肪芽孢杆菌只处于次要位置。

2.2 ATAD 系统中病原微生物的灭活情况

在 ATAD 系统中倍受关注的另一类微生物是污泥中的病原微生物。污泥中病原生物的去是污泥无害化的重要指标,也是污泥农用的必要条件。已有的研究表明,ATAD 对细菌、病毒、寄生虫卵等病原生物都有很好的灭活效果,明显优于各种传统中温处理工艺^[5-9]。ATAD 对病原微生物的灭活效果受停留时间、温度、pH 和悬浮固体浓度等条件

的影响^[10,11]。在适当的操作条件下,ATAD 处理后的污泥可以满足美国环保局 40CFR503 规定中 A 类生物固体对病原微生物的要求^[2],将污泥农用的病原微生物风险降低到可以接受的水平。

3 ATAD 系统中的物质转化过程

Hamer 等^[12,13]阐述了高温好氧消化过程中有机颗粒物质的降解过程,如图 1 所示,主要有 2 个步骤:第一步,生污泥中的固体颗粒物质在嗜热微生物胞外酶的作用下发生溶胞和水解,转化成溶解性可降解产物;第二步,溶解性可降解产物被嗜热微生物细胞利用,转化成羧酸、二氧化碳等代谢产物或者嗜热微生物的细胞。

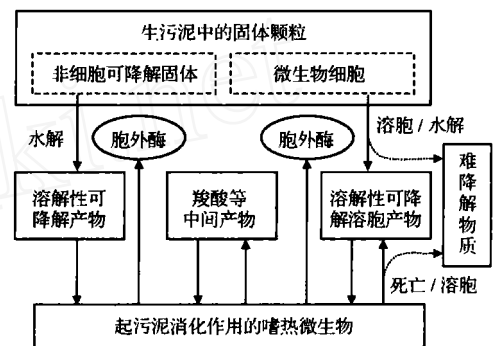


图 1 ATAD 污泥处理过程中的有机物转化图

Fig. 1 Transformation of organic matters in ATAD sludge treatment process

3.1 剩余活性污泥处理过程中的溶胞过程

在污水厂污泥尤其是剩余活性污泥中,微生物细胞是污泥有机物的主要存在形式。剩余活性污泥中,由于大部分有机物被细胞壁封闭在细胞内,很难与水解酶等有机物降解酶接触,更难被功能微生物吸收利用实现最终的矿化,因此溶胞过程在污泥尤其是剩余活性污泥的处理过程中,对污泥处理效率具有重要影响。在 ATAD 处理剩余活性污泥的过程中,溶胞主要发生在初始阶段,伴随着溶胞的发生,VSS 快速下降,上清液中溶解性有机碳含量和氨氮含量、正磷酸盐含量快速上升^[12-16]。

根据目前的研究结果,ATAD 处理污泥过程中的溶胞是加热和嗜热微生物共同作用的结果。高温条件会导致污泥中的一部分微生物发生溶胞。在 70 加热剩余活性污泥 1 h 即可获得 20%~25% 的 VSS 去除率^[17]。微生物细胞在高温条件下的溶解会由于某些嗜热菌的存在而加剧。Hasegawa

等^[17]从 ATAD 反应器中分离得到一株具有溶胞能力的嗜热脂肪芽孢杆菌,该菌不仅能够分泌蛋白酶和淀粉酶等胞外酶,而且可促进高温灭菌后的剩余活性污泥发生溶化(VSS减少)。

3.2 ATAD 系统中有机碳的转化

ATAD 处理污泥过程初期,伴随着水解和溶胞,颗粒态有机碳的含量将下降,而溶解性有机碳(DOC)的含量将上升;之后颗粒态有机碳缓慢减少并趋于稳定,而溶解性有机碳则由于被嗜热微生物利用而含量逐渐降低^[13],如图 2 所示^[14]。

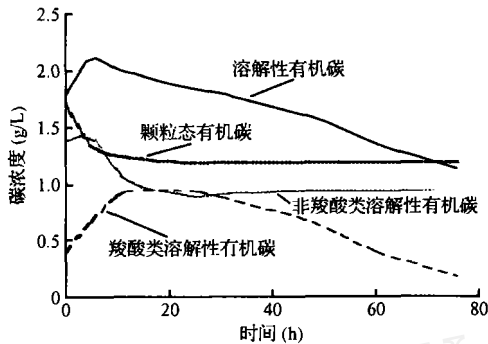


图 2 污泥 ATAD 处理过程中有机碳的转化曲线

Fig. 2 Transformation curves of organic carbon in ATAD sludge treatment process

ATAD 处理污泥的过程中,由于有机物浓度较高,嗜热菌代谢速率较快,因而很容易出现局部供氧不足的现象,这种氧气供应小于氧气需求的状态称为微好氧状态(microaerobic)。在微好氧条件下,很容易形成挥发性脂肪酸(VFA)。根据 Haner 等^[14]的研究结果,VFA 是在微好氧条件下运行的 ATAD 反应器中 DOC 的重要组成部分,DOC 中除 VFA 之外的物质,主要为生物降解速率很慢的类似于腐殖质的物质。

VFA 的产生量与 ATAD 反应器的曝气、温度以及污泥的性质有关。Chu 等^[18,19]的研究结果表明,ATAD 工艺处理初沉污泥,在微好氧条件下,可产生大量 VFA,而当曝气量增加,使反应器处于好氧条件时,VFA 产生量大幅减少。在 Cheunbaml 等^[20]的研究中,当其他条件相同时,挥发性酸的产生量在 55~65 范围内随温度升高而增加。在 Fothergill 等^[21]的研究中,不同比例的初沉污泥和剩余活性污泥混合物,剩余活性污泥比例越高,VFA 的产生量和累积量越高。

在 Chu 等^[18]的研究中,ATAD 产生的 VFA 中乙酸、丙酸所占份额最大,分别为 81% 和 11%,在 Ha-

mer 等^[12]的研究中也得到了相似的结果。

Haner 等^[22]利用放射性标记乙酸研究了乙酸在 ATAD 系统中的代谢情况,发现有 75% 的乙酸转化为二氧化碳,11% 转化为颗粒态物质,14% 转化成了上清液中降解速率更加缓慢的物质。

3.3 ATAD 系统中氮磷的转化

对于 ATAD 系统中氮的转化规律研究较少,而这方面的研究常会发现一些新的现象。蛋白质是污泥的主要组分之一,由于污泥中蛋白质的水解和氨基酸的脱氨作用,在 ATAD 处理初期,上清液中氨氮浓度将快速升高,但伴随着氨氮被吸收用于细胞合成或者以氨气的形式从系统中排出,上清液中氨氮的浓度将会下降^[15]。

通常认为在 ATAD 系统中,由于温度较高,抑制了硝化细菌的活性,因此基本上不发生硝化反应,但 Banat 等^[16]的研究发现,NO₃⁻-N 浓度从最初的 1 mg/L 左右上升到 4 d 后的 20 mg/L 左右。Lee 等^[23]通过对处理猪粪的 ATAD 系统氮元素平衡的研究,发现在该系统中,约有 2/3 的氮通过气体形式从系统中排出,其中 29% 的氮以氮气的形式排出,9% 的氮以 N₂O 的形式排出,只有 28% 的氮以 NH₃ 的形式排出。N₂O 的检出表明在该 ATAD 系统中存在一种尚未被充分认识的代谢途径。在 Kelly 等^[24]用 ATAD 处理污泥的研究中,在氧气过剩条件下也产生了 NO_x。以上研究结果表明对于 ATAD 系统中氮的转化还有很多的现象未能得到合理的解释。

对于 ATAD 处理过程中磷转化规律的研究也非常少。伴随着溶胞过程的进行,污泥中的磷将释放到上清液中,在 Banat 等^[16]的研究中,上清液中 PO₄³⁻-P 的浓度达到了 70 mg/L (处理剩余活性污泥浓度为 3% SS)。

初步研究表明,生物除磷过程中形成的富磷污泥在 ATAD 系统中的转化更加复杂。在 Kelly 等^[24]的研究中,低曝气量导致了 10% 的磷从污泥固相部分释放到了上清液中,而高曝气速率条件可保持比低曝气量下低的溶解性磷浓度,要减少磷的释放量,应将溶解氧浓度维持在 1.5~2.0 mg/L。在 Fothergill 等^[21]的研究中,在微好氧条件下用 ATAD 处理富磷污泥,也导致了磷的大量释放。

4 ATAD 系统的控制参数

由于 ATAD 系统与中温厌氧等传统工艺相比能耗较高,因而有必要提高 ATAD 系统的自动化控制

水平以提高整个系统的运行效率。目前已经提出了多种控制参数,这些参数基本上可以分为2类:物理化学参数和生物化学参数。

较常采用的物理化学控制参数包括溶解氧(DO)、pH、氧化还原电位(ORP)等。在早期的ATAD自动控制中溶解氧被作为控制参数控制氧气的供应量^[25];但由于ATAD系统中温度较高,固体含量较高,溶解氧的含量不容易测准,后来逐渐被ORP替代。由于反应混合物的ORP与反应器的供氧状态^[26,27]及VFA产生量有较好的对应关系,采用ORP作为控制参数对于保证二级消化系统中甲烷的产生量以及为脱氮除磷工艺提供碳源都具有非常重要的意义,而且ORP测量简便,反应迅速,因此被作为ATAD运行的控制参数之一^[21]。

生物化学控制参数主要是在最近几年提出的。Ugwanyi等^[28,29]在研究处理农业废弃物的ATAD时发现,淀粉酶、木聚糖酶和蛋白酶活性同微生物的活性以及处理过程有很好的对应关系,因此可将其作为ATAD运行的监测指标。此外,Km等^[30]在研究中发现,尼克酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)荧光可以有效地指示ATAD反应器中微生物的状态,并可用于控制ATAD反应器的进泥和排泥。

5 ATAD处理后污泥的脱水性能

脱水性能的恶化是许多高温消化工艺都面临的问题,ATAD工艺也不例外。经过ATAD工艺处理的污泥通常需要比中温好氧消化投加更多的聚合物才能获得相同的脱水效果^[31]。Zhou等^[31]的研究表明:处理前的污泥性质会显著影响ATAD处理后污泥的脱水性能,混合污泥中剩余活性污泥含量越高脱水性能恶化越严重;影响ATAD处理后污泥脱水性能的主要因素存在于污泥的液相^[32],液相中胞外聚合物(蛋白质、多糖)含量同污泥的脱水性能之间有非常强的相关关系,ATAD处理后的污泥再经过蛋白酶处理,脱水性能可改善13%~19%。Murthy等^[33]的研究也发现,上清液中蛋白质和多糖的浓度与所需聚合物的投加量有很好的正相关关系。

研究者提出了各种改善ATAD处理后污泥脱水性能的方法。一种常用的方法是添加铁盐或铝盐。在Murthy等^[34]的研究中,通过投加铝盐或铁盐可以降低上清液中蛋白质和多糖的浓度,并明显减少需要的聚合物投加量;同时铁盐和铝盐的投加还可减少脱水上清液中磷的含量,减少脱水上清液回流

对污水处理系统的压力。Abu-Orf等^[35]的研究也得到了类似的结果,投加 $0.1\text{ g FeCl}_3/\text{g DS}$ 即可使聚合物的投加量减少50%。

此外,Murthy等^[33]还提出一种新的改善ATAD处理后污泥脱水性能的方法,即对ATAD处理后的污泥进行中温(20℃)曝气。在他们的研究中,中温曝气可以减少溶液中蛋白质和多糖的浓度,并减少对聚合物的需求量,聚合物需求量的减少程度取决于中温段和高温段的停留时间,除此之外,通过中温曝气还可以减少污泥的气味、脱水上清液中的泡沫、COD以及磷酸盐的含量。

6 基于ATAD的新型污水污泥处理工艺

6.1 基于VFA的新工艺

在一定条件下,ATAD反应器中可以产生大量的VFA,由于VFA可以被多种工艺所利用,因此利用ATAD可以开发出一系列基于VFA的新工艺。

首先,VFA可作为脱氮除磷的碳源,其反硝化速率高于原污水作为碳源的反硝化速率。Li等^[36]研究了ATAD上清液作为生物脱氮除磷工艺碳源的可行性。研究结果表明,在微好氧条件下运行的ATAD上清液(含有高浓度的VFA)可以作为外加碳源强化脱氮除磷效果,其效率类似于醋酸钠,而且上清液中还含有其他可作为碳源的有机物。由于在ATAD上清液中含有一定量的氮磷,会增加脱氮除磷系统的负担,因此必须对整个系统进行优化,使易利用碳源产生量尽可能大,利用率尽可能高,而对脱氮除磷系统造成的负担尽可能小。

尽管利用ATAD上清液生产可降解塑料PHA的研究还没有报道,但利用废物发酵产生的高浓度VFA生产PHA的研究已经有很多报道。在Lee等^[37]的研究中,污泥高温厌氧消化产生大量脂肪酸,消化污泥上清液中78%的有机碳可被高效PHA生产菌*Alcaligenes eutrophus*利用,菌体中PHA含量与采用纯VFA得到的PHA含量相当。Hassan等^[38]利用棕榈油废水厌氧发酵产生的有机酸合成了PHA。Rhu等^[39]也利用高乙酸含量的食品废物合成了PHA。因此,ATAD与PHA生产工艺相结合也可能是污泥资源化的一条新途径。

6.2 基于溶胞技术的剩余污泥减量化工艺

通过溶胞强化污泥微生物的隐性生长是一类重要的减少剩余污泥产生量的技术^[40]。在污泥高温好氧消化的初期,会发生溶胞过程,因此可利用AT-

AD开发低剩余污泥产量的新型污水处理工艺。Shiota等^[41,42]利用此原理开发出一种大幅减少剩余污泥产量的 S-TE工艺(如图 3所示)。该工艺是在传统活性污泥工艺的基础上,在污泥回流支路上添加一个处理污泥的 ATAD系统,使一部分污泥在二沉池浓缩后进入 ATAD系统,在嗜热菌的作用下被溶化,溶化后的污泥再返回活性污泥系统进行进一步的处理。根据此原理设计的装置连续运行 270 d后,总的剩余污泥产量减少了 93%,出水水质与对照系统(即不包含 ATAD反应器的废水处理系统)相比,SS和 TOC只有轻微的上升。由他们设计的一个用于处理生活污水的实际规模(250 m³/d)的系统连续运行 3年,总的剩余污泥产生量减少了 75%^[42]。根据他们的估计,采用这种工艺,可使传统污泥处理工艺(脱水+焚烧+土地处置)的成本减少 30%~50%。

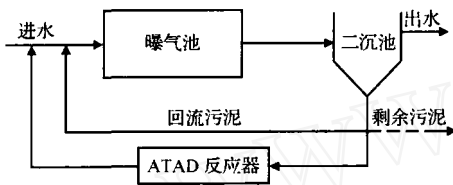


图 3 S-TE工艺流程图

Fig. 3 Schematic diagram of S-TE process

7 结 语

ATAD工艺具有反应速率快,停留时间短,病原微生物灭活效果好等优点,并已经得到了实际应用。国外对该工艺已经做了大量的研究工作,国内还没有应用实例,相关研究也少见报道。目前,对 ATAD工艺已经有了一定的认识,但还有许多现象还没有得到合理的解释。通过对 ATAD系统微生物特性、物质转化规律等方面的深入研究,将有助于提高 ATAD系统的运行效率,降低建设和运行成本,并推动基于 ATAD技术的新型污水、污泥处理工艺的开发与应用。

参 考 文 献

[1] Grady C. P.L., Daigger G. T., Lin H. C. 著,张锡辉,刘勇弟译. 废水生物处理. 北京:化学工业出版社, 2003. 367~388

[2] U. S. Environmental Protection Agency. Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion of Municipal Wastewater Sludge. Lancaster: Technomic Publishing Company Inc.,

1990

- [3] Sonnleitner B., Fiechter A. Bacterial diversity in the mesophilic aerobic sewage sludge II Types of organisms and their capacity. Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol., 1983, 18: 174~180
- [4] Hensel R., Denharter W., Hilpert R. The microflora involved in aerobic-thermophilic sludge stabilization System. Appl. Microbiol., 1989, 11: 312~319
- [5] Zabranska J., Dohanyos M., Jenicek P., et al. Efficiency of autothermal thermophilic aerobic digestion and thermophilic anaerobic digestion of municipal wastewater sludge in removing *Salmonella* spp. and indicator bacteria. Water Science and Technology, 2003, 47(3): 151~156
- [6] Cheunbam T., Pagilla K. R. Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of sludge. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 2000, 126(9): 790~795
- [7] Pagilla K. R., Craney K. C., Kido W. H. Aerobic thermophilic pretreatment of mixed sludge for pathogen reduction and nocardia control. Water Environmental Research, 1996, 68(7): 1093~1098
- [8] Whitmore T. N., Robertson L. J. The effect of sewage-sludge treatment process on oocysts of *Cryptosporidium parvum*. Journal of Applied Bacteriology, 1995, 78(1): 34~38
- [9] Juris P., Plachy P., Laukova A. Devitalization of bacterial and parasitic germs in sewage-sludge during aerobic digestion under laboratory conditions. Veterinarni Medicina, 1995, 40(5): 157~162
- [10] Ugwuanyi J. O., Harvey L. M., McNeil B. Effect of process temperature, pH and suspended solids content upon pasteurization of a model agricultural waste during thermophilic aerobic digestion. Journal of Applied Microbiology, 1999, 87(3): 387~395
- [11] Ponti C., Sonnleitner B., Fiechter A. Aerobic thermophilic treatment of sewage-sludge at pilot plant scale 2. Technical solutions and process design. Journal of Biotechnology, 1995, 38(2): 183~192
- [12] Hamer G. Fundamental aspects of aerobic thermophilic biodegradation. A. M. Bruce, F. Colin and P. J. Newman. Treatment of Sewage Sludge: Thermophilic Aerobic Digestion and Processing Requirements for Landfilling. London: Elsevier Applied Science, 1989. 2~19
- [13] Mason C. A., Haner A., Hamer G. Aerobic thermophilic waste sludge treatment. Water Science and Technology, 1992, 25(1): 113~118
- [14] Haner A., Mason C. A., Hamer G. Death and lysis during aerobic thermophilic sludge treatment-characterization of recalcitrant products. Water Research, 1994, 28(4): 863~869
- [15] Banat F. A., Prechtel S. B., Bischof F. Experimental assessment of bio-reduction of Di-2-thylhexyl phthalate (DEHP) under aerobic thermophilic conditions. Chemosphere, 1999, 39(12): 2097~2106

- [16] Banat F. A. , Prechtl S. B. , Bischof F. Aerobic thermophilic treatment of sewage sludge contaminated with 4-nonylphenol *Chemosphere*, **2000**, 41 (3) : 297 ~ 302
- [17] Hasegawa S. , Shiota N. , Katsura K. , et al Solubilization of organic sludge by thermophilic aerobic bacteria as a pretreatment for anaerobic digestion *Water Science and Technology*, **2000**, 41 (3) : 163 ~ 169
- [18] Chu A. , Mavinic D. S. , Kelly H. G. , et al Volatile fatty acid production in thermophilic aerobic digestion of sludge *Water Research*, **1994**, 28 (7) : 1513 ~ 1522
- [19] Chu A. , Mavinic D. S. , Kelly H. G. , et al The influence of aeration and solids retention time on volatile fatty acid accumulation in the thermophilic aerobic digestion of sludge *Environmental Technology*, **1997**, 18 (7) : 731 ~ 738
- [20] Cheunbaml T. , Pagilla K. R. Temperature and SRT effects on aerobic thermophilic sludge treatment *Journal of Environmental Engineering*, **1999**, 125 (7) : 626 ~ 629
- [21] Fothergill S. , Mavinic D. S. VFA production in thermophilic aerobic digestion of municipal sludges *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, **2000**, 126 (5) : 389 ~ 396
- [22] Haner A. , Mason C. A. , Hamer G. Aerobic thermophilic waste sludge biotreatment-carboxylic-acid production and utilization during biodegradation of bacterial-cells under oxygen limitation *Applied Microbiology and Biotechnology*, **1994**, 40 (6) : 904 ~ 909
- [23] Lee J. W. , Lee H. W. , Kim S. W. , et al Nitrogen removal characteristics analyzed with gas and microbial community in thermophilic aerobic digestion for piggery waste treatment *Water Science and Technology*, **2004**, 49 (5 ~ 6) : 349 ~ 357
- [24] Kelly H. G. , Mavinic D. S. Autothermal thermophilic aerobic digestion research, application and operational experience. WEFTEC 2003 Workshop W104, Thermophilic Digestion, Los Angeles, CA. , October 11, **2003**
- [25] Trim B. C. , McGlashan J. E. Sludge stabilization and disinfection by means of autothermal aerobic digestion with oxygen *Water Science and Technology*, **1984**, 17: 563 ~ 573
- [26] Staton K. , Pressley R. , Eloff J. , et al Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion: Conceptual Issues and Process Advancements WEF Biosolids Conference, San Diego, CA **2001**
- [27] Scisson J. P. ATAD, the next generation: design, construction, startup and operation of the first municipal 2nd generation ATAD. WEF/AWWA/CWEA Joint Residuals and Biosolids Management Conference and Exhibition, **2003**
- [28] Ugwuanyi J. O. , Harvey L. M. , McNeil B. Protease and xylanase activities and thermophilic populations as potential process monitoring tools during thermophilic aerobic digestion *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **2004**, 79 (1) : 30 ~ 38
- [29] Ugwuanyi J. O. , Harvey L. M. , McNeil B. Development of thermophilic populations, amylase and cellulase enzyme activities during thermophilic aerobic digestion of model agricultural waste slurry *Process Biochemistry*, **2004**, 39 (11) : 1661 ~ 1669
- [30] Kim Y. K. , Choi J. W. Fuzzy controller for thermophilic aerobic digestion using nicotinamide adenine dinucleotide fluorescence *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, **2004**, 130 (7) : 759 ~ 765
- [31] Zhou J. P. , Mavinic D. S. , Kelly H. G. , et al Experimental assessment of factors influencing dewatering properties of thermophilically digested biosolids *Wastewater Sludge As A Resource*, **2003**. 111 ~ 118
- [32] Zhou J. P. , Mavinic D. S. , Kelly H. G. , et al Effects of temperatures and extracellular proteins on dewaterability of thermophilically digested biosolids *Journal of Environmental Engineering and Science*, **2002**, 1 (6) : 409 ~ 415
- [33] Murthy S. N. , Novak J. T. , Holbrook R. D. , et al Mesophilic aeration of autothermal thermophilic aerobically digested biosolids to improve plant operations *Water Environmental Research*, **2000**, 72 (4) : 476 ~ 483
- [34] Murthy S. N. , Novak J. T. , Holbrook R. D. Optimizing dewatering of biosolids from autothermal thermophilic aerobic digesters (ATAD) using inorganic conditioners *Water Environmental Research*, **2000**, 72 (6) : 714 ~ 721
- [35] Abu-Orf M. M. , Griffin P. , Dentel S. Chemical and physical pretreatment of ATAD biosolids for dewatering *Water Science and Technology*, **2001**, 44 (10) : 309 ~ 314
- [36] Li J. Z. , Mavinic D. S. , Kelly H. G. Determining the volatile fatty acid equivalent in thermophilic aerobically digested sludge supernatant *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, **2004**, 130 (4) : 397 ~ 407
- [37] Lee S. , Yu J. Production of biodegradable thermoplastics from municipal sludge by a two-stage bioprocess *Resource Conservation and Recycling*, **1997**, 19 (3) : 151 ~ 164
- [38] Hassan M. A. , Shirai Y. , Kusubayashi N. , et al The production of polyhydroxyalkanoate from anaerobically treated palm oil mill effluent by *Rhodobacter sphaeroides* *Journal of Fermentation and Bioengineering*, **1997**, 83 (5) : 485 ~ 488
- [39] Rhu D. H. , Lee W. H. , Kim J. Y. , et al Polyhydroxyalkanoate (PHA) production from waste. *Water Science and Technology*, **2003**, 48 (8) : 221 ~ 228
- [40] 梁鹏, 黄霞, 钱易. 污泥减量化技术的研究进展. *环境污染治理技术与设备*, **2003**, 4 (1) : 44 ~ 52
- [41] Shiota N. , Akashi A. , Hasegawa S. A strategy in wastewater treatment process for significant reduction of excess sludge production *Water Science and Technology*, **2002**, 45 (12) : 127 ~ 134
- [42] Sakai Y. , Aoyagi T. , Shiota N. , et al Complete decomposition of biological waste sludge by thermophilic aerobic bacteria *Water Science and Technology*, **2000**, 42 (9) : 81 ~ 88