

# 水处理污泥处理处置研究进展

刘海丽<sup>1</sup>, 杜元新<sup>2</sup>

(1. 江南大学生物工程学院, 江苏 无锡 214036; 2. 无锡市环境监测中心站, 江苏 无锡 214023)

**摘要:** 污水污泥是城市废水处理后的终端产物, 既是一种生物质原料, 可以被有效地资源化和能源化, 同时又含有大量有毒有害物质, 如何妥善地处理处置污水污泥, 已成为全社会关注的课题。浅析了污水污泥的处理处置方法以及当前的研究热点和新技术。污泥处理处置的发展方向为减量化、稳定化, 以及在无害化前提下的资源化、能源化。

**关键词:** 污泥; 处理处置; 研究进展

中图分类号: X 7

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2010)-06-0050-04

## Advances in Sewage Sludge Treatment Technology and Disposal Strategy

LIU Hai-li, DU Yuan-xin

(1. School of Biotechnology, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214036, China; 2. Wuxi Environmental Monitoring Central Station, Wuxi, Jiangsu 214023, China)

**ABSTRACT:** Sludge is the main solid waste from sewage treatment plant. Because of its potential harmful impact on the environment, disposal of sewage sludge is becoming a rising challenge all over the world. Progresses in treatment technology and disposal strategy of sewage sludge are discussed. As a kind of biomass, the future direction of sludge treatment and disposal will be reduction, stabilization, resourceful utilization and energy recovery on the premise of harmlessness.

**KEY WORDS:** sewage sludge; reduction; artificial wetlands; thermal treatment

污水污泥(以下简称“污泥”)是城市废水处理后的终端产物, 其中含有大量病原菌, 寄生虫卵, 铜、锌、铬、汞、铅、镉、镍等重金属, 以及盐类、多氯联苯、二噁英等难降解的有毒有害物质, 并常伴有恶臭气味<sup>[1]</sup>, 成为影响环境卫生的一大公害。笔者在研究当前各种方式的污泥处理处置热点技术的基础上, 分析各种处理处置及技术方法的环境影响和经济性, 探讨污泥处理处置的发展方向。

### 1 污泥处理

污泥处理主要包括污泥浓缩、脱水、消化(厌氧消化和好氧消化)、堆肥和干化等工艺过程, 目的是达到污泥的减容、减量、稳定以及无害化。

#### 1.1 污泥减容

污泥的含水率高不利于后续处理, 如堆肥、填埋和焚烧等都建立在较低的含水率基础上, 因此需要减容, 降低污泥的含水率, 减少污泥的体积, 主要工艺有浓缩、脱水和干化。

研究发现, 适宜的微波辐射可明显改善污泥结构及脱水性<sup>[2]</sup>。微波干化能有效减少污泥体积,

减少有机物和重金属的溶出, 但能耗较大<sup>[3]</sup>。

对污泥进行水热处理可以改善污泥脱水性能及沉降性能, 同时也能提高污泥的消化性能<sup>[4]</sup>。

污泥热干化技术近些年发展较快。利用热能可将污泥烘干, 同时, 高温灭菌工艺可以杀灭病原体。其能耗比污泥直接焚烧低, 效率远高于堆肥和风干, 处理后污泥减容显著, 有利于储藏和运输, 检测合格的可以用做肥料、土壤改良剂、替代能源等。

#### 1.2 污泥减量

活性污泥工艺是应用最广泛的污水处理方法, 但缺点是污泥产量大, 不论哪种污泥处理处置方法都或多或少伴随着对环境的负面影响, 最理想的是在污水处理过程中, 采用适当的工艺和处理方法, 使污泥中的有机物含量和污泥产量减少。国内外报道的污泥减量化技术主要有:

(1) 降低细菌合成量的解耦联技术: 利用微生物氧化磷酸化解耦联控制污泥的产生, 如投加解耦

收稿日期: 2009-08-28

作者简介: 刘海丽(1975—), 女, 工程师, 硕士, 从事生物化学领域研究工作。

联剂、高底物浓度/污泥浓度、改变污泥所处环境的厌氧和好氧状态、升高温度、提高盐浓度,以及提高供氧量等方法<sup>[5,6]</sup>。其中解偶联剂使用方便,但化学解偶联剂本身可能对环境有潜在的危害性,同时还会使污泥的脱水和沉降性能变差。

(2) 增强微生物利用二次基质进行隐性生长的各种溶胞技术:如臭氧氧化、二氧化氯氧化、碱解等化学方法;超声波、热处理、压力等物理方法;投加能分泌胞外酶的细菌或直接投加酶制剂或抗菌素等生物方法<sup>[5,6]</sup>。

各种溶胞方法中臭氧氧化的减量效果最好,但成本偏高,且出水中 N、P 含量高,限制了应用。二氧化氯氧化比臭氧氧化成本低,但出水色度、浊度、COD 有所升高,且氯化过程中会产生有害产物三氯甲烷。污泥碱解和热处理虽然能减少污泥产率,但需要大量的 NaOH 和热量,投资和运行费用高,且污泥的 BOD/N 的值和 COD、NH<sub>3</sub> 的值会升高。污水处理中投加酶制剂或是抗菌素也是有效的污泥减量方法,但需要的投放量大,成本高。

超声波可以破解污泥中的细胞和有机质,剩余污泥量可以减少 20% ~ 50%,并能提高污泥的稳定化程度,促进污泥消化,改善污泥的脱水性能<sup>[7]</sup>。德国已经全面使用超声波技术处理废水污泥,国内尚处于实验阶段。

(3) 利用食物链作用强化微型动物对细菌捕食的技术:建立起由多种多样的微生物组成的复杂的生态系统,形成诸如细菌——原生动物——后生动物之类的食物链。微型动物作为捕食者,将污泥最终转化为能量、水和 CO<sub>2</sub>,从而使污泥量减少<sup>[8]</sup>。此方法所需能耗和资金较少,能有效减少污泥产量,但出水的 N、P 浓度高,相关研究尚不成熟。

### 1.3 污泥稳定化

污泥处理的效果直接影响污泥的最终处置,国内污水厂处理污泥时多采用浓缩脱水而较少采用稳定化处理,污泥含水率往往达不到要求,增加了运输的难度,为后续的污泥处置带来极大不便。

污泥稳定化是通过物理、化学或生化反应,使其中的有机物发生分解或降解为矿化程度较高的无机化合物的过程,具体方法有:碱(石灰)稳定、厌氧消化、好氧消化、堆肥、化学稳定和热稳定等。

污泥经过高温消化,可达到进一步降低水分、生化稳定、杀灭虫卵和致病菌的目的。从国内外现有的消化工艺看,好氧消化由于设备投入大,运行

能耗高,比厌氧消化成本高。厌氧消化过程中产生的沼气也可以作为能源回收利用。

近年来,辐射技术在污泥稳定化方面的研究屡见报道。研究较多的是由<sup>60</sup>Co 或<sup>137</sup>Cs 产生的  $\gamma$ -射线和由电子加速器产生的高能电子束。污泥中有大量病原体,用  $\gamma$ -射线或电子束辐照污泥消毒的效果较之堆肥、热处理或化学方法更加彻底与稳定,并能改善污泥脱水和生物降解性能。经  $\gamma$ -射线辐射处理后,污泥的平均粒径减小,产气量大大增加,消化率明显提高<sup>[9]</sup>。辐射处理污泥技术具有良好的应用前景,但装置的一次性投入比较大, $\gamma$ -射线处理存在核辐射,安全措施要求高,大多项目尚处于研究和实验论证阶段。目前只有德国、美国和印度等少数国家进行了  $\gamma$ -射线污泥处理的应用,电子束在污泥处理上的应用尚未见报道<sup>[10]</sup>。

利用人工湿地来稳定污泥是污泥处理的一种新思路。采用人工湿地处理污水已有一百多年历史,其运行和设计都积累了丰富的经验。污泥中液体部分的污染物可被湿地中的生物有效净化,固体部分则被截留于湿地表面,靠自身消化及湿地生态活动得到减量和稳定。处理后,湿地内残存污泥的固体物质含量提高,有机物分解速率快,渗透水质好<sup>[11]</sup>。人工湿地具有处理效果好、经济成本低、环境友好和高效等特点,它必将发展成为一种集环境效益、经济效益及社会效益为一体的污泥处理方式<sup>[12]</sup>。

## 2 污泥处置

污泥处置是将处理后的污泥或污泥产品以自然或人工方式达到长期稳定并对生态环境无不良影响并最终消纳方式,主要包括:填埋、土地利用(用于农田、林地、园林绿化和土地恢复等)、焚烧以及综合利用(建材利用)等<sup>[13]</sup>。

### 2.1 填埋

国内多数污水处理厂污泥主要处置方法是填埋。该方法简单易行,成本低,但消耗宝贵的土地资源,更会因污泥处置不彻底而造成环境污染。随着填埋用地日渐减少和填埋场费用的逐渐增加,污泥填埋的比例将越来越小。欧洲自 1998 年禁止海洋弃置后,现在污泥填埋比例为 40%,相关法规越来越严格,这种方式正逐渐被淘汰。

### 2.2 土地利用

污泥土地利用即将污泥施用于农田、林地和绿

化用地等。是最古老和最经济的污泥处置方法,一方面可增加土壤肥力,将污泥有效地资源化,另一方面可利用土壤的自然净化能力,解决环境污染问题。欧洲污泥农用的比例占 37%,是污泥处置的主要方式,另有 12% 为用于林地和土地恢复等。

由于污泥中含有各种病原菌、重金属、放射核素以及难降解的有毒有机化合物等,会污染土壤,最终危害人类和环境,因此,污泥必须经过稳定化和无害化处理才能进行土地利用。研究表明,稳定化和矿化程度高的污泥中重金属的稳定性好,而未经稳定化的污泥中重金属的流动性大,易被生物利用或交换<sup>[14]</sup>。但有研究发现,厌氧消化后的污泥中 Cr 的含量很高,仍有 31% 的 Cr 为不稳定态<sup>[15]</sup>。因此,即使是厌氧消化的污泥农用也必须严格控制,做好对施用地的有害物质浓度监测。在欧洲,未经稳定化处理的污泥已经被禁止农用,污泥农用的标准越来越严,社会的接受和认可程度也限制了这种方式的应用。

### 2.3 热处理

随着污泥处理处置问题的日益严峻,污泥的热处理技术受到重视。其目的是充分利用污泥中物质蕴含的能量,同时实现污泥无害化、减量化,最大程度地减少对环境的不良影响,主要包括:焚烧、湿式氧化、热解、气化、混合焚烧等。

#### 2.3.1 焚烧

污泥填埋场日益短缺,焚烧则能有效减少污泥体积、破坏有毒有机物、减少气味,并能利用污泥中的热值发电供热。近年来,焚烧的工艺和能源效率有了很大提高,流化床焚烧炉得到广泛应用,高水分的污泥也能被焚烧,使得焚烧成为富有吸引力的污泥处置方式。日本的污泥处置以焚烧为主<sup>[16]</sup>,欧洲污泥焚烧的比例也达 11%。

但焚烧并不是污泥中生物能源的最好利用方式,污泥中 30% 左右的固体成分在焚烧后会以灰渣形式存在。灰渣由于含有高浓度的重金属等有毒有害成分,其后续的处理、填埋和制造建筑材料会遇到许多问题<sup>[17]</sup>。另外,焚烧会产生温室气体  $N_2O$  以及其他有害气体,需要额外设备进行净化<sup>[16]</sup>。如果能改进技术,控制有害排放,减少净化成本,焚烧将比其他方式具有更大优势。

#### 2.3.2 湿式氧化

污泥湿式氧化是在一定温度和压力下向污泥中通入空气、氧气或过氧化物等氧化剂,使污泥中

的有机成分在水相下发生热降解、水解、氧化,最终转化为  $CO$ 、 $H_2O$  和  $N_2$ 。该过程中释放大量的热,反应一旦开始,可以自己维持,无需外界能量<sup>[18]</sup>。

水的临界温度和压力分别是 374 °C 和 22 MPa,湿式氧化可以在低于 374 °C 和 10 MPa 压力的亚临界条件或是在高于 374 °C 和 22 MPa 压力的超临界条件下进行。亚临界条件相对容易达到,反应易于控制,在国外得到了一定的商业应用。超临界水氧化处理污泥近年来得到了发展和应用,美国和日本先后建成了多座超临界水氧化处理污泥装置<sup>[19]</sup>。国内该技术尚处于实验研究阶段。

湿式氧化技术适于处理各种难降解的有机污泥,但缺点是设备复杂,运行和维护费用高,另外 10% ~ 20% 的有机物难以被完全氧化。

#### 2.3.3 热解

污泥热解是在无氧和 300 ~ 900 °C 温度条件下,污泥中的有机物发生热分解、缩聚反应,生成气体、焦油和固态热解残留物,其中热解气体主要为  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$  和  $CO_2$  等。热解气体和焦油热值高,可以作为能源。热解残留物可与煤混合燃烧进一步回收其中的热量,亦可通过改性作吸附剂。

研究发现微波可以诱导热解,当微波直接辐照污泥时,仅起到对其干燥的作用,而当污泥中加入炭(本身也是热解残留物)等吸收微波的介质时,微波辐照可以使污泥迅速升温,发生热解,比常规热解方法节省了时间和能耗<sup>[20]</sup>。

热解比焚烧更为环保,能量回收率高,经济性优于焚烧,但尚未得到广泛应用,热解机理和动力学需要进一步研究,其工艺和设备有待改进。

#### 2.3.4 气化

污泥气化即污泥经过干燥、热解后,热解产物在还原状态的气化室中被气化,生成  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$  和  $CO_2$  等清洁可燃性气体,这些气体可作为燃料发电和供热,也可作为化工原料或用于燃料电池。该法因其主要产物  $H_2$  为清洁能源而更受关注。

BODOGROB 对污泥流化床气化做了产能分析,污泥经过高压脱水和低温流化床干燥器干化后,在常压流化床气化炉中气化生成贫气(以甲烷为主),经过清洁步骤后,被送入热电联产单元燃烧产生热能和电能。研究表明,污泥流化床气化处理工艺的产能大于耗能,具有很好的经济性<sup>[21]</sup>。

MARRERO 等人的研究表明,气化时 Cd、Sr、Cs、Co 和 Zn 等重金属残留在了灰中;而气化气中

的 Hg 大部分被截留在过滤器中,残留在灰中的重金属则非常稳定,即使在 50% 体积浓度的硝酸中亦很少被渗滤出来<sup>[22]</sup>。污泥气化可有效避免污泥焚烧时所产生的烟气二次污染,同时克服了污泥热解时固态残留物中剩余能量的再利用问题。热解产物除了气体之外还有焦油,而气化的主要产物是气体,焦油成分的产物很少,因此简化了后续的清洁程序,减少了成本。因此,污泥气化技术被认为是最有应用前途的污泥处置技术。然而,目前污泥气化技术的研究工作开展的还较少。

### 2.3.5 混合焚烧

污泥混合焚烧是将污泥与其他燃料混合燃烧,包括与垃圾混合焚烧、水泥窑或砖窑中混合焚烧、热电厂焚烧炉混合焚烧发电等多种形式<sup>[23]</sup>。限制污泥与其他燃料混合比例的因素主要有:① 重金属和灰尘的排放;② 混合燃料的物理化学性质(热值、水分含量、灰渣的化学成分等)。污泥混合焚烧在世界各国都有应用,但技术并不成熟。

## 3 结语

污泥减量从根本上减少污泥的产生,避免后续处理处置的经济成本和二次环境污染,具有应用前景。同时,应不断研发新技术,充分利用污泥的生物原料特点,将其资源化和能源化,并避免环境污染。目前污泥填埋仍占很大比例,这种方式不具有可持续性,对环境产生二次污染。现阶段,土地利用仍是污泥处置的一条重要途径,能将污泥有效地资源化,但污泥必须经过有效的稳定化和无害化处理,并经检测合格,同时加强对施用土地的监测。污泥热处理技术实现了污泥的资源化和能源化,受到广泛重视。其中污泥焚烧技术已获得广泛的应用,而污泥气化技术则更具有应用前景。

### [参考文献]

- [ 1 ] GOMEZ-RICO M F, FONT R, ARACIL I, et al. Analysis of organic pollutants in sewage sludges from the Valencian Community ( Spain ) [ J ]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 52(3) : 306-316.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] MENÉNDEZ J A, DOMINGUEZ A, INGUANZO M, et al. Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification ( MWDPG ) of sewage sludge: Vitrification of the solid residue[ J ]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2005, 74(1-2) : 406-412.
- [ 4 ] 荀锐,王伟,乔玮,等. 城市污泥处理现状与强化脱水的水热减量技术[ J ]. 环境卫生工程, 2008, 16(2) : 28-32.
- [ 5 ] 梁鹏,黄霞,钱易. 污泥减量化技术的研究进展[ J ]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 4(1) : 44-52.
- [ 6 ] 李洋,曹国凭. 污泥减量化技术的研究现状和进展[ J ]. 河北理工大学学报, 2009, 31(2) : 139-142.
- [ 7 ] 刘春红,杨顺生,戴本林. 我国超声波处理污泥技术的研究进展[ J ]. 安徽化工, 2007, 33(2) : 20-22.
- [ 8 ] 曹宏,徐军,周可新,等. 利用微型动物削减剩余污泥量的研究[ J ]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(1) : 1-5.
- [ 9 ] 郑正,袁守军,张继彪,等.  $\gamma$ -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.
- [ 10 ] WANG J L, WANG J Z. Application of radiation technology to sewage sludge processing: A review[ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143(1-2) : 2-7.
- [ 11 ] JEAN L, DE M. Constructed wetlands for sludge dewatering[ J ]. Water Science and Technology, 1997, 35(5) : 279-285.
- [ 12 ] 张丽苹,崔玉波,刘宇,等. 城市污水污泥生态稳定新技术[ J ]. 吉林建筑工程学院学报, 2008, 25(1) : 13-16.
- [ 13 ] 余杰,田宇宁,王凯军,等. 中国城市污水处理厂污泥处理、处置问题探讨分析[ J ]. 环境工程学报, 2007, 1(1) : 82-86.
- [ 14 ] FUENTES A, LORENS M, SAEZ J, et al. Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges[ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 108(3) : 161-169.
- [ 15 ] 沈晓南,谢经良. 厌氧消化后污泥中的重金属形态分布[ J ]. 中国给水排水, 2002, 18(11) : 51-52.
- [ 16 ] HARA K, MINO T. Environmental assessment of sewage sludge recycling options and treatment processes in Tokyo[ J ]. Waste Management, 2008, 28(12) : 2645-2652.
- [ 17 ] MALERIUS O, WERTHER J. Modelling the adsorption of mercury in the flue gas of sewage sludge incineration[ J ]. Chemical Engineering Journal, 2003, 96(1-3) : 197-205.
- [ 18 ] SVANSTROM M, MODELL M, TESTER J. Direct energy recovery from primary and secondary sludges by supercritical water oxidation[ J ]. Water Science and Technology, 2004, 49(10) : 201-208.
- [ 19 ] 方明中,孙水裕,林楚娟,等. 超临界水氧化技术在城市污泥处理中的应用[ J ]. 水资源保护, 2008, 24(3) : 66-68.
- [ 20 ] MENÉNDEZ J A, INGUANZO M, PIS J J. Microwave - induced pyrolysis of sewage sludge[ J ]. Water Research, 2002, 36(13) : 3261-3264.
- [ 21 ] GROSS B, EDER C, GRZIWA P, et al. Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification[ J ]. Waste Management, 2008, 28(10) : 1819-1826.
- [ 22 ] MARRERO T, MCAULEY B, SUTTERLIN W, et al. Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge[ J ]. Waste Management, 2003, 24(2) : 193-198.
- [ 23 ] 高亮,邵德洲,张曙光,等. 污泥掺烧技术研究[ J ]. 环境卫生工程, 2008, 16(4) : 48-51.

(本栏目编辑 熊光陵)