

# 城市污泥厌氧消化产沼气资源化研究

曹冬梅<sup>1</sup>, 刘坤<sup>2</sup>

(1.西南交通大学环境科学与工程学院、成都610031; 2.成都市固体废物卫生处置厂、成都610108)

**摘要：**系统地综述了我国城市污泥处置与利用的现状和趋势，并重点讨论了污泥厌氧消化产沼气的可行性，介绍了提高消化速度的先进技术以及生物法沼气脱硫技术。认为污泥厌氧消化产沼气的资源化利用是符合我国国情的，并将成为我国污泥处置与利用的一种有效途径。

随着我国城市化进程的加快，城市污水处理率逐年提高，城市污水厂的污泥产生量也急剧增加。据估算<sup>[1]</sup>

，目前我国城市污水处理厂年排放的污泥量(干重)大约为130万t，而且年增长率大于10%，特别是在我国城市化水平较高的几个城市与地区，污泥出路问题已经十分突出。如果城市污泥全部得到处理，则将产生污泥量(干重)840万t，占我国总固体废弃物的3.2%。

污泥是城市污水处理和废水处理不可避免的副产物，含有大量的有机质和营养元素，能量巨大。另一方面，我国正面临着巨大的能源与环境压力，矿物能源和资源日益耗尽，开发并生产各种可再生能源，替代煤炭、石油和天然气等化石燃料是世界今后解决能源紧缺的一种有效途径。在德国，城市污水厂通过污泥沼气发电，可满足其自用电力的57%<sup>[2]</sup>。因此，利用污泥消化产沼气发电不仅能够解决污泥出路的问题，还使得污泥作为一种资源得到了利用。

## 1 污泥常用处置方法

污泥是由有机残片、细菌体、污泥颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均质体。目前，国内外对污泥的处置及回用方法主要有以下几种<sup>[3-5]</sup>

：海洋处置、卫生填埋、污泥焚烧、污泥干化和热处理、污泥农用、污泥消化产沼气以及一些小范围的污泥利用方法，包括污泥制砖、污泥制生化纤维板、污泥制陶粒等。

污泥的各种处置方法各有优缺点<sup>[3-8]</sup>

。投海已有多年的历史，但是生物固体产生量巨大，毒性和重金属种类多，含量丰富，倒入海洋势必造成严重的甚至是灾难性后果。因此该方法近年来已被国际禁止。卫生填埋对污泥的无毒无害化处理成本低，并可以增加城市建设用地。然而，城市污泥卫生填埋也存在许多问题，如填坑中的有害物质会通过雨水的浸蚀和渗漏作用污染地下水环境，填埋处理所需时间较长等。污泥焚烧的优点是既解决了污泥的出路问题又充分地利用了污泥中的能源，而且污泥不需要作灭菌处理，缺点是成本较高，污泥中的重金属随着烟尘的扩散而污染空气。污泥农用可大量处置污泥，而且充分利用了污泥中的N、P、K等营养物质，但是因为人们对污泥农用的安全性存有疑虑，很大程度上限制了污泥农用。污泥工业化利用由于产品销路不畅，暂时还不可能成为污泥处置的一条主要途径。利用污泥消化产沼气使污泥处理基本实现稳定化、无害化、减量化、资源化4个目标。一方面发酵后产生的沼气可用于发电，是一种可再生能源；另一方面，剩余的熟污泥可根据其成分特点用于农业、燃料等行业。从沼气发电的成本估算可知，沼气发电是大中型污水厂的最佳方案，不但为处理厂解决了部分能源而且在经济上具有很大的效益。

## 2 污泥消化原理及影响因素

### 2.1 厌氧消化的基本原理

厌氧消化就是在无氧的条件下，由兼性菌和专性厌氧菌(甲烷菌)降解有机物，分解的最终产物为二氧化碳和甲烷的过程。此过程非常复杂，当前较为公认的理论模式是将厌氧消化分为液化、产酸和产甲烷3个阶段。

### 2.2 影响污泥厌氧消化的因素<sup>[4, 5, 9, 10]</sup>

污泥厌氧消化是一个系统过程，主要的影响因素有以下几个：

(1)温度。温度对污泥的分解速率和产气量有较大的影响，通常在实际工程中均采用中温消化，因为所需的温度越

高，加热生污泥至消化温度所需的热量也相应增大，消化池与环境的温差大使热损失越多。

(2)酸碱度。从发酵过程来看，酸性阶段产乙酸，使污泥的pH值降低，碱性阶段分解乙酸，使污泥的pH值升高，所以在正常的甲烷发酵过程中，无须随时调节。为了产气早、产量高，可以将启动时的pH值调到7.5 - 7.8。

(3)搅拌。搅拌的目的是使室内各处温度均匀，进入的原料与池内的熟料完全混合，底质与微生物完全接触，防止发酵浆料分层，底部物料出现酸积累。

(4)营养与碳氮比。消化池的营养由投配污泥供给，营养配比中最重要的是C/N比。C/N比太高，细菌氮量不足，消化液缓冲能力降低；C/N比太低，含氮量过多，使有机物分解受到抑制。对于污泥消化处理来说，C/N为(10 - 20) 1较合适。

(5)投配率。投配率系数是指每日加入消化池的新鲜污泥体积与消化池体积的比率。正常运行的消化池处于碱性发酵阶段，如果加入的生污泥过多，则酸的生成速率将大于酸的分解速率，挥发酸将在污泥中积累，破坏碱性发酵；但如果加入的生污泥过少，消化池的容积将增大，增加运行费用。因此，污泥的投配率应当适当，一般在5% - 12%。

(6)有毒物质。有毒物质主要包括重金属、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、表面活性剂以及 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 等，它们对甲烷细菌有抑制作用。

### 3 沼气发电技术

沼气发电的过程是一个能量转换的过程，在发动机的汽缸中沼气被点燃，燃烧放热，化学能转化为气体的热能和压能，气体的压能推动活塞，带动发动机转动，压能转化为动能，发动机通过轴带动发电机发电，动能转化为电能；气体的热能一部分传给缸套水，一部分在废气热回收装置中传给循环水，剩余部分则散失损失了。沼气的燃烧热只有25% - 30%能作为沼气发电机利用，其余的70%中有30%传给水套中的热水，30%被烟道气带走，10%散失损失<sup>[8]</sup>。

#### 3.1 国外沼气发电现状

沼气发电在发达国家已受到广泛重视和积极推广，如美国的能源农场，德国的可再生能源促进法的颁布，日本的阳光工程，荷兰的绿色能源等。生物质能发电并网在西欧(德国、丹麦、奥地利、芬兰、法国、瑞典等)一些国家的能源总量的比例为10%左右，预计本世纪末将增加到25%。另外，沼气发电设备方面，德国、丹麦、奥地利、美国的纯燃沼气发电机组比较先进，气耗率 $0.5\text{m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ (沼气热值 $25\text{MJ}/\text{m}^3$ )。我国在“九五”

、“十五”期间研制出20600kW纯燃沼气发电机组系列产品，气耗率 $0.6 - 0.8\text{m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ (沼气热值 $21\text{MJ}/\text{m}^3$ )，其性价比有较大的优势，适合我国经济发展状况<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 国内沼气发电现状

目前，天津市纪庄子污水厂和北京高碑店污水厂就是采用比较完善的污泥厌氧消化处理系统，产生的沼气用于沼气搅拌和发电，沼气发动机的热水作为消化污泥加热的热源，实现了热联供电和资源的综合利用。

高碑店污水处理厂是北京最大的污水处理厂，日处理污水能力为 $100\text{万m}^3$ ，日处理污泥 $4000\text{m}^3$ ，该厂通过技术改造和调整工艺，最大限度地收集沼气，每天沼气发电量已经可以保持在 $3 \times 10^4\text{kW}\cdot\text{h}$ 左右。年发电量有望突破 $10^7\text{kW}\cdot\text{h}$ ，相当于5000户家庭1年的用电量。

### 4 污泥厌氧消化产沼气工艺

污泥厌氧消化产沼气工艺流程如图1。



图 1 污泥厌氧消化产沼气工艺流程

#### 4.1 厌氧消化产沼气的优化技术

早在20世纪80年代，国外就有研究者[12, 13]指出，水解是厌氧消化的限制步骤，污泥细胞壁的结构对胞内易降解物质的水解有抑制作用，所以，污泥消化产气往往需要较长的时间发酵。以下两种方法在一定程度上能够加快水解、产气速度，提高产气量。

##### 4.1.1 污泥的超声波预处理

用超声波技术处理污泥，就是利用其在液体中产生的“空穴”作用，形成极端的物理和力学条件，将微生物细胞壁击破，同时释放出酶，酶使其余未被击破的微生物细胞失去对污泥罐中发酵环境的适应能力，迅速成为厌氧微生物的营养物而被消耗，大大加速发酵过程，提高沼气产量。需要进行超声处理的只是其中的一小股污泥，一般取剩余污泥的30%左右。从运行成本的角度考虑，也不必将其中的微生物细胞全部击破，而只是一小部分，因为被击破的微生物细胞释放出的酶等物质可以使整个水解过程加速<sup>[6]</sup>。

此项技术在我国还处于研究阶段，没有工程实例。国外有研究表明，使用超声波(3.6kW, 31kHz, 64s)预处理污泥，污泥中溶解性化学需氧量(SCOD)由630mg/L上升到2270mg/L，而且可以使污泥消化的停留时间缩短至8d<sup>[14]</sup>。

在20kHz下，0.12W/cm<sup>3</sup>的超声波处理4h将可溶性COD占总COD的比值(SCOD/TCOD)从36%提高到89%，可溶性N的比值从34%提高到42%，基本取代了污泥水解过程，从而缩短污泥厌氧发酵时间并提高了污泥可生化性<sup>[15]</sup>。

污泥发酵时间与超声波处理时间对沼气产率也有很大影响，有研究表明在15d的发酵时间下，超声波预处理2h可以提高沼气产量61%，而在12d发酵时，几乎没有变化<sup>[16]</sup>。

而超声波处理40min比10min的处理提高沼气产量59%<sup>[17]</sup>。

值得注意的是有机物释放通常滞后于菌胶团的破坏，因此超声波促进污泥脱水所需时间很短，而促进污泥发酵通常需要较高的超声波强度(>0.3W/cm<sup>3</sup>)和较长的处理时间(>10min)。据估算<sup>[7]</sup>

，在我国如果使用超声波污泥处理设备，沼气发电满足自用电力比例可达到37%。此外，根据Yoon等人的研究，通过处理剩余污泥并将之回流到生物池，有可能实现污泥的零排放[18]，但是该研究目前还处在实验室阶段，没有工程实例。

##### 4.1.2 臭氧增加产气量

臭氧是一种十分活跃的强氧化物质，能破坏污泥的细胞壁，使细胞壁中的易降解物质释放出来，并且能够将难降解的大分子物质分解成易降解的小分子物质，从而提高了水解速率，促进污泥厌氧消化。

比利时的M.Weemaes等人<sup>[19]</sup>

对消化罐进泥采用臭氧预处理，

泥样为初沉池污泥和剩余污泥的混合物，臭氧投加量(O<sub>3</sub>

/COD)

为0.1g/g，最终，污泥的产气量为未经臭氧处理的污泥的1.8倍，产气速率为未经臭氧处理的污泥的2.2倍。

在我国，利用臭氧降解污泥

处于初步研究阶段，没有工业化应用。王琳等人研究表明<sup>[20]</sup>

，在相同臭氧投量下，通入低浓度臭氧可增加臭氧与污泥的接触反应时间，提高污泥分解的效果；综合考虑系统的效率和经济性，O<sub>3</sub>

/SS为0.1g/g是最佳投量点。上海市城市排水有限公司与奥地利VATECHWABAG公司合作，采用臭氧与厌氧消化组合工艺进行了实验室小试试验，结果如下：当臭氧投量O<sub>3</sub>

/DS为0.06g/g，有机物平均降解率从不加臭氧的45%提高至65%，沼气产量增加了30%~40%<sup>[5]</sup>。所以，在污泥厌氧消化工艺中适当的结合臭氧氧化技术，是一种非常有前景的污泥处理工艺。

#### 4.2 沼气脱硫

在沼气产生的过程中伴随着H<sub>2</sub>S气体的产生，H<sub>2</sub>S气体不仅对人的身体健康有很大的危害，对管道、仪表及设备还具有很强的腐蚀性。因此，必须采取措施进行沼气脱硫。可以用于沼气脱硫的方法有两种，即生物法和物化法。以往物化法广泛地用于硫化氢的去除中，且累积了丰富的经验，但却存在着运行费用高、投资大、产生二次污染等缺点。生物法以其设备简单、能耗低、产生二次污染少，尤其适合处理低浓度气态污染物的特点受到人们的广泛重视。

根据生物处理反应器中使用的介质性质不同，生物法主要分为生物洗涤和生物过滤两种方式。早在1941年，M.Prus s等人便在德国取得了生物过滤去除H<sub>2</sub>S气体的专利。

20世纪80年代在德国

、日本、荷兰等国家有相当数量工业规模的各类生物净化装置投入使用<sup>[21]</sup>

。目前，许多发达国家如日本、德国、美国、荷兰等对生物脱硫技术和设备的开发已经商品化。2004年5月，宜兴协

<sup>3</sup>，为沼气的综合利用提供了技术保证。

我国这方面的研究才刚起步，方士等人<sup>[22]</sup>

利用反应塔外曝气、介质循环供氧处理沼气中的H<sub>2</sub>S，结果表明：当进气H<sub>2</sub>S质量浓度为1.1g/m<sup>3</sup>，进气量为0.34L/min时，去除率可达98.6%；当进气H<sub>2</sub>S质量浓度为2.44g/m<sup>3</sup>

，进气量为0.17

L/min时，去除率为10

0%。系统运行的最佳酸度为pH1.92.0，尾气中残留氧的浓度不超过0.56g/m<sup>3</sup>

，远远低于国家标准，且具有较强的抗冲击负荷能力。此外，国内许多高校如：同济大学、昆明理工大学、河北科技大学等对生物脱硫做了大量的实验室研究，恶臭气体生物净化的发展也为生物法沼气脱硫提供了依据，为该方法的应用开辟了广阔的空间。

#### 5 结语

随着《可再生能源法》的实施，生物质能源的开发和利用受到国家的鼓励。污泥是一种有价值的资源，利用其消化产沼气，既解决了污泥出路问题，又开发了新的能源，这是可持续发展的体现。

在我国，利用超声波及臭氧预处理污泥还是比较新的技术，经国外的实践证明，它们对污泥消化速率的加快、沼气产量的增加以及剩余污泥的减量化都有很大的帮助。此外，利用生物法沼气脱硫在我国也是一门新兴的学科，它以其设备简单、能耗低、产生二次污染少的特点受到了越来越多人的关注。因此，这几种技术势必会随着污泥沼气工程的发展而迅速发展起来的。结合我国国情及各个城市污水厂的实际情况来看，污泥厌氧消化产沼气在我国有巨大的发展潜力，它实现了污泥减量化、稳定化、无害化和资源化的统一。

#### 参考文献

- 1、杭世珺，陈吉宁，等.污泥处理处置的认识误区与控制对策.中国给水排水，2004，20(12)：89-92
- 2、Kart，Klaus R Imboff.Taschenbuch der stadtentwaesserung，29.Auflage.Mucnehen，Wien：TU Braunchweig Verlag，1999.289
- 3、赵乐军，杨津义.污泥填埋技术综述.天津市政设计，2003(3)：13-17

- 4、周少奇.城市污泥处理处置与资源化.广州：华南理工大学出版社，2003.106-115
- 5、张辰.污泥处理处置技术研究进展.北京：化学工业出版社，2005
- 6、马娜，陈玲.城市污泥资源化利用研究.生态学杂志，2004，23(1)：86-89
- 7、杨顺生，高晓勇.超声波技术在污泥处理利用中的应用现状及前景预测.四川环境，2006，25(1)：61-65
- 8、孟庆杰，沙丽，等.我国城市污水厂污泥、沼气产量与综合利用现状及前景.中国市政工程，1996(4)：50-56
- 9、王立国.厌氧消化与沼气发电.市政技术，2004(4)
- 10、李建政，汪群慧.废物资源化与生物能源.北京：化学工业出版社，2004.66-78
- 11、颜丽.沼气发电产业化可行性分析.太阳能，2004(5)：12-15
- 12、Palostathis S G，Gossett J M.A preliminary conversion mechanisms in anaerobic digestion of biological sludges.Journal of Environmental Engineering，ASCE，1986，114：575-592
- 13、Gossett J M，Belsler R L.Anaerobic digestion of water activated sludges.ASCE，1982，108：1101
- 14、Tiehm A，Nickle K，Neis U.The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge.Wat Sci Tech，1997，36(11)：121-128
- 15、Y Chiu，C Chang，J Lin，et al.Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion.Wat Sci Tech.，1997，36，(11)：155-162
- 16、PB Clark，I Nujjoo.Ultrasonic sludge pretreatment for enhanced sludge digestion.J CIWEM，14，66-71
- 17、Q Wang，M Kuninobu，et al.The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge.Wat Sci Technol，1997，36，(11)：121-128
- 18、Yoon，Seong-Hoon，Lee Sangho.Critical operational parameters for zero

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/103231.html>