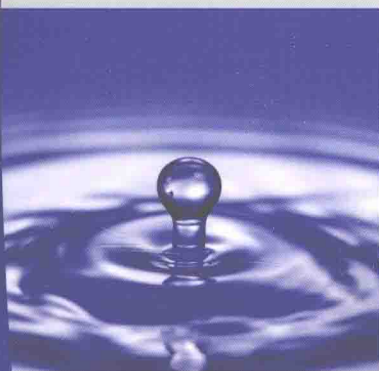


张 辰 主 编

王国华 谭学军 副主编

城镇污水厂 污泥厌氧消化工程 设计与建设



CHENGZHEN WUSHUICHANG
WUNI YANYANG XIAOHUA GONGCHENG
SHEJI YU JIANSHE



化学工业出版社

张 辰 主 编

王国华 谭学军 副主编

城镇污水厂 污泥厌氧消化工程 设计与建设



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共 8 章, 内容包括概论、污泥厌氧消化工艺、污泥厌氧消化预处理、沼气收集、贮存与利用、沼液污染控制与资源化利用、污泥厌氧消化系统设计、污泥厌氧消化工程建设与运行管理、污泥厌氧消化工程实例。本书可供环境工程、市政工程专业教学、设计和运行管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

城镇污水厂污泥厌氧消化工程设计与建设/张辰主编.
—北京: 化学工业出版社, 2014. 11
ISBN 978-7-122-21662-5

I. ①城… II. ①张… III. ①城市污水-污水处理厂-
污泥处理-厌氧处理 IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 198499 号

责任编辑: 董 琳
责任校对: 王 静

装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15 彩插 1 字数 351 千字 2015 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

目前,我国城镇污水处理厂污泥年产生量已达 3000 万吨(含水率 80%),至“十二五”末期预计年产量 5000 万吨左右。污水污泥究竟如何经济持续地实现减量化、稳定化、无害化和资源化的问题,未得到根本解决。厌氧消化是一种低能耗、资源化的污泥处理技术,处理过程能耗较低,能回收沼气能源,可减少温室气体排放。2009 年颁布的《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策(试行)》和 2011 年颁布的《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》,均鼓励回收和利用污泥中的能源和资源,鼓励城镇污水处理厂采用污泥厌氧消化工艺。

截至目前,我国仅 50 多座城镇污水处理厂建造了污泥厌氧消化设施,不足全国总数的 5%,我国污泥厌氧消化技术未得到广泛应用的原因,除与我国泥质特性有关以外,厌氧消化设施设计、建造、运行和管理等方面缺乏成功经验同样是重要因素。本书以近期新建的一些污泥厌氧消化重大工程为契机,通过梳理国内外污泥厌氧消化最新技术进展,总结典型厌氧消化工程建设与运行全过程经验,可解答国内同行在项目实践中存在的困惑,以期为我国污泥厌氧消化工程的科学建设和管理提供帮助。

本书共 8 章,内容包括概论、污泥厌氧消化工艺、污泥厌氧消化预处理、沼气收集、贮存与利用、沼液污染控制与资源化利用、污泥厌氧消化系统设计、污泥厌氧消化工程建设与运行管理、污泥厌氧消化工程实例,可供环境工程、市政工程专业教学、设计和运行管理人员参考。

本书由上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司和上海排水管理单位共同编写,由张辰担任主编并负责审稿,王国华、谭学军担任副主编。第 1 章由王逸贤编写;第 2 章由吕永鹏、王磊编写;第 3 章由谭学军、魏海娟、许洲编写;第 4 章由陆松柳编写;第 5 章由沈昌明编写;第 6 章由王磊磊、孙晓编写;第 7 章由卢峰编写;第 8 章由陈嫣、谭学军、胡维杰、汪喜生等编写。

由于编者水平有限,本书疏漏和不当之处在所难免,请读者批评、指正。

编者

2014 年 6 月

目 录

第1章 概论 /1

1.1 污泥厌氧消化技术概述	2
1.1.1 污泥厌氧消化技术发展	2
1.1.2 污泥厌氧消化技术特点	3
1.2 污泥厌氧消化技术应用	3
1.2.1 国内污泥厌氧消化技术应用	3
1.2.2 国外污泥厌氧消化技术应用	5

第2章 污泥厌氧消化工艺 /7

2.1 污泥厌氧消化生化基础	8
2.1.1 污泥厌氧消化的阶段	8
2.1.2 污泥厌氧消化动力学	9
2.1.3 污泥厌氧消化微生物学	11
2.2 污泥厌氧消化影响因素	13
2.2.1 温度	13
2.2.2 污泥浓度	14
2.2.3 污泥种类	14
2.2.4 酸碱度	14
2.2.5 营养物和微量元素	15
2.2.6 有毒物质	15
2.2.7 污泥接种	16
2.2.8 搅拌与混合	17
2.2.9 预处理	17
2.2.10 污泥龄	18
2.3 污泥厌氧消化工艺	18
2.3.1 传统厌氧消化工艺	19
2.3.2 两级厌氧消化工艺	19
2.3.3 两相厌氧消化工艺	19
2.4 污泥厌氧消化工艺发展	20
2.4.1 高含固厌氧消化工艺	20
2.4.2 污泥与有机固废共消化工艺	21

第3章 污泥厌氧消化预处理 123

3.1 高温热水解预处理技术	24
3.1.1 原理	24
3.1.2 工艺	24
3.2 超声波预处理技术	26
3.2.1 超声波作用原理	27
3.2.2 影响因素	27
3.3 其他预处理技术	29
3.3.1 碱解处理技术	29
3.3.2 臭氧氧化法	30
3.3.3 高压喷射法	30

第4章 沼气收集、贮存与利用 131

4.1 沼气性质	32
4.2 沼气收集净化	34
4.2.1 沼气脱水	34
4.2.2 沼气脱硫	35
4.3 沼气提纯	36
4.4 沼气贮存	37
4.4.1 储气柜的布置原则	38
4.4.2 低压湿式储气柜	38
4.4.3 高压干式储气柜	39
4.4.4 低压干式储气柜	40
4.5 沼气利用	40
4.5.1 沼气发电	41
4.5.2 沼气锅炉	42

第5章 沼液污染控制与资源化利用 143

5.1 沼液性质	44
5.2 沼液处理技术路线	44
5.3 沼液处理技术	45
5.3.1 沼液处理要求	45
5.3.2 沼液预处理技术	46
5.3.3 沼液处理技术	49
5.4 沼液的资源化利用	64
5.4.1 鸟粪石除氮磷概述	64
5.4.2 鸟粪石除氮磷工艺	65

5.4.3 鸟粪石除氮磷主要影响因素	65
5.4.4 沼液制鸟粪石工艺前景	66

第6章 污泥厌氧消化系统设计 /67

6.1 设计参数	68
6.2 厌氧消化池设计	69
6.2.1 工艺设计	69
6.2.2 池型和构造	72
6.2.3 搅拌系统	73
6.2.4 加热系统	79
6.2.5 药剂投配系统	87
6.3 沼气系统设计	87
6.3.1 集气罩	87
6.3.2 产气收集输送系统	88
6.3.3 沼气安全设备	90

第7章 污泥厌氧消化工程建设与运行管理 /93

7.1 污泥厌氧消化工程建设概述	94
7.2 污泥厌氧消化系统土建工程	96
7.2.1 土建工程功能和作用	96
7.2.2 消化池结构形式和构造	97
7.2.3 卵形消化池施工工艺	98
7.2.4 圆柱形消化池施工工艺	112
7.3 污泥厌氧消化工程验收要点	113
7.4 污泥厌氧消化系统启动	113
7.5 污泥厌氧消化系统日常运行	115
7.5.1 进料	115
7.5.2 温度控制	116
7.5.3 浮渣控制	116
7.5.4 搅拌系统	116
7.5.5 沉积物的形成和控制	118
7.5.6 监测和测试	118
7.5.7 消化池失稳和控制方法	120
7.5.8 故障诊断和排除指南	122
7.6 沼气收集系统运行管理	128
7.6.1 沼气净化装置运行维护	128
7.6.2 储气柜运行维护	129

7.7 污泥加热系统运行管理	130
7.8 安全管理	130
7.8.1 防火间距	130
7.8.2 爆炸危险区域等级和范围划分	132
7.8.3 压力监控	134

第8章 污泥厌氧消化工程实例 /135

8.1 国外工程实例	136
8.1.1 爱尔兰都柏林 Ringsend 污水处理厂污泥厌氧消化工程	136
8.1.2 日本横滨市污泥处置中心	137
8.2 国内工程实例	140
8.2.1 上海白龙港污水处理厂污泥厌氧消化工程	140
8.2.2 重庆鸡冠石污水处理厂污泥厌氧消化工程	149
8.2.3 青岛麦岛污水处理厂的污泥厌氧消化工程	157
8.2.4 昆明主城区城市污水处理厂污泥处理处置工程	165
8.2.5 厦门第二污水处理厂污泥厌氧消化工程	169

附录 /174

附录一 城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术 政策（试行）	174
附录二 关于印发城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南 （试行）的通知	178

参考文献 /230

第1章

概 论

污泥厌氧消化是利用微生物的代谢作用，同步分解有机物和产生沼气生物质能的污泥稳定化和资源化技术。经过多年的发展实践，污泥厌氧消化技术不仅日臻成熟，而且还在不断改进和创新，以实现污泥稳定化和资源效益的最大化。本章概述了污泥厌氧消化技术发展和特点，介绍了污泥厌氧消化技术的国内外应用情况。

1.1 污泥厌氧消化技术概述

1.1.1 污泥厌氧消化技术发展

污泥厌氧消化是利用兼性菌和厌氧菌进行厌氧生化反应，分解污泥中有机物质，使之达到减量化和稳定化，同时产生沼气的一种污泥处理技术。

19 世纪末，厌氧消化技术开始应用于污泥稳定化处理。早期用于厌氧消化的构筑物是化粪池和双层沉淀池。

化粪池是一个矩形密闭的池子，用隔墙分为两室或三室，各室之间用水下连接管接通。污水由一端进入，通过各室后由另一端排出，悬浮物沉于池底后进行缓慢的厌氧发酵，各室顶盖上设有人孔，可定期将消化后的污泥挖出，供作农肥。化粪池通常设于独立的居住或公共建筑物的下水管道上，用于初步处理粪便废水。

双层沉淀池上部有一个流槽，槽底呈 V 形。污水沿槽缓慢流过时，悬浮物便沉淀下来，并从 V 形槽底缝滑落于圆形池底，并进行厌氧消化。

化粪池和双层沉淀池仅起截留和降解有机悬浮物的作用，其缺点是产生的沼气难以收集利用。

20 世纪 20、30 年代开始，污泥厌氧消化技术得到了大量的研究和应用，并开始进行沼气的收集利用。1971 年 Ghosh 和 Poland 针对产酸菌和产甲烷菌对环境要求的差异，提出了两相厌氧消化处理工艺，实现了生物相的分离，使产酸相和产甲烷相成为两个独立的处理单元，分别为产酸菌和产甲烷菌创造最佳生态条件，提高厌氧处理效率和反应器的运行稳定性。

与此同时，人们对厌氧消化的生物学过程和生化过程的认识不断深化，厌氧消化理论也得到了不断扩展。Thumm、Reichie 和 Imhoff 提出了厌氧消化两阶段理论，将有机物厌氧消化过程分为酸性发酵和碱性发酵两个阶段，并由 Buswell 和 Neave 进行了完善。1979 年，在两阶段理论的基础上，Bryant 提出了三阶段理论，是目前相对得到公认的一种理论。之后还有学者提出了四阶段理论等。

传统的污泥厌氧消化具有反应缓慢、有机物降解率低和甲烷产量较低的缺点，限制了厌氧消化技术优势的发挥。根据 Bryant 的三阶段理论，水解是污泥厌氧消化过程中的限速步骤。因此，从 20 世纪 70 年代起，人们对包括高温热水解、超声波预处理、碱解预处理和臭氧预处理等物化方法在内的各种污泥厌氧消化强化技术开展了研究，通过击破污泥的细胞壁，使胞内有机物质从固相转移到液相，促进污泥水解，提高污泥厌氧消化效果。

随着各国污泥量不断增加和对能源需求、处理后污泥品质要求的不断提高，一些原有的污泥厌氧消化设施面临扩容和改造。污泥预处理技术可以改善污泥厌氧消化效果、改善

污泥脱水效果和提高沼气产量，在一定程度上能够替代消化池扩容带来的效益，因此得到了广泛的研究应用。其中，高温热水解技术相对较为成熟，目前，该技术已开发出 Cambi 热水解、Biothelysis 热水解和 Monsal 酶解等多种工艺，近年来在欧洲得到推广应用，挪威、英国和澳大利亚均有成功应用的案例。

针对传统污泥厌氧消化含固率低的限制，高含固污泥厌氧消化技术的研究也成为热点。高含固污泥厌氧消化的优势在于沼气产生效率高于传统的厌氧消化，原因是进泥含固率大幅度升高，厌氧消化池内单位微生物量能接触消化的有机物量大为提高，其产气效率和处理负荷亦随之提高。目前国外已开发出多种高含固污泥厌氧消化技术，并已在实际工程中得到应用，如芬兰的 HLAD 工艺，控制进入预反应池的污泥含固率为 10%~15%，产气效率相比传统污泥厌氧消化高出 30%。但其技术本身还存在一些难点，如反应基质浓度高、搅拌阻力大、能耗高和启动难度大等，因此一般需进行污泥的预处理。

1.1.2 污泥厌氧消化技术特点

污泥厌氧消化是污水处理厂进行污泥稳定化、减量化和资源化的重要手段之一，其技术特点归纳如下。

(1) 可实现污泥稳定化

厌氧消化过程可削减污泥中的有机物，杀死部分病原菌和寄生虫卵，使污泥得到稳定化，不易腐臭，避免在运输及最终处置过程中对环境造成不利影响，也有利于污泥的后续处置。

(2) 可实现污泥资源化

厌氧消化过程产生的沼气中含有 60%~70% 的甲烷（体积比），其热值约为 21000~25000kJ/Nm³，可实现污泥生物质能的有效回收，除满足厌氧消化自身的能量需求外，余量还可用于厂区发电或其他能源供应。厌氧消化后的熟污泥经进一步处理后还可进行土地利用。

(3) 可实现污泥减量化

厌氧消化过程可降解污泥中 35%~50% 的挥发性固体，减少污泥干固体量，有利于降低后续污泥处理处置费用。同时厌氧消化有助于提高污泥脱水性能，脱水后污泥体积可进一步减少。

1.2 污泥厌氧消化技术应用

1.2.1 国内污泥厌氧消化技术应用

我国自“九五”开始推广污泥厌氧消化技术，在 2009 年颁布的《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策（试行）》和 2011 年颁布的《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南（试行）》中又进一步鼓励采用污泥厌氧消化工艺对污泥中的能源和资源进行回收利用。目前，在上海、北京、重庆、青岛、大连、深圳、厦门均有成功运行的污泥厌

氧消化工程。其中,上海白龙港污水处理厂的超大型污泥厌氧消化工程于2011年6月正式投入运行,处理污泥量占到上海市污泥总产生量的30%左右,对白龙港污水处理厂污泥稳定化和资源化起到了重要作用。

据不完全统计,我国目前仅有约63座城市污水处理厂建有或在建污泥厌氧消化系统,其中29座厌氧消化系统正常运行,3座在建或调试,其余建成未运行或停运。采用污泥厌氧消化工艺的污水处理厂处理能力为 $(2.5\sim 200)\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,包括小型污水处理厂($<5\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$)8座、中型污水处理厂 $[(5\sim 10)\times 10^4\text{m}^3/\text{d}]$ 11座、大型污水处理厂 $[(10\sim 40)\times 10^4\text{m}^3/\text{d}]$ 28座和超大型污水处理厂($\geq 40\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$)16座

正常运行的29座污泥厌氧消化系统包括1座小型污水处理厂、6座中型污水处理厂、13座大型污水处理厂和9座超大型污水处理厂,各规模正常运行的厌氧消化系统占建成系统的比例分别为小型污水处理厂3.4%、中型污水处理厂20.7%、大型污水处理厂44.8%和超大型污水处理厂31.0%。建成未运行的污泥厌氧消化系统与污水处理厂规模有关,相对来说,小污水处理厂正常运行的污泥厌氧消化系统最少,而超大型污水处理厂厌氧消化系统正常运行的比例最高。主要原因是超大型污水处理厂普遍技术能力较强,人员配备齐全,管理更好,克服污泥厌氧消化运行过程中的问题的能力更强,同时由于规模效应,其沼气产生的经济效益也比较显著。

我国绝大多数污泥厌氧消化系统采用中温厌氧消化,其中采用一级消化和二级消化工艺的比例接近1:1,采用二级厌氧消化的略多。沼气利用以供热为主,用于污泥升温以及满足厂内其他加热用途,另外也有沼气发电、直联式沼气风机等利用途径。

总体来说,我国的污泥厌氧消化系统建成的比例远低于欧美等发达国家,而且停运或未运行的比例则接近1/2。这一方面是因为我国污泥厌氧消化技术在工艺设计和运行管理方面的水平偏低,与发达国家存在较大差距;另一方面也是因为已建的污泥厌氧消化工程过于依赖国外技术和设备,而我国污泥泥质与国外污泥泥质差异极大,无法简单照搬国外经验。国内污泥厌氧消化技术的应用主要存在以下几个问题。

(1) 我国的饮食习惯是低蛋白质、高碳水化合物,因此,与国外污泥相比我国污泥的有机物含量较低,VS/TS在30%~50%之间,而发达国家VS/TS一般可达60%~70%。尤其是采用合流制系统的城市,污泥的有机物含量可能更低,污泥有机物含量低导致了厌氧消化的产气量和沼气热值都偏低,大大影响了污泥厌氧消化的经济效益。

(2) 污水预处理中的除渣、除砂效率低,导致我国污泥中的含砂量较高,浮渣、砂粒这些物质会降低消化池有效容积,破坏搅拌和加热,影响气体的产生和收集,扰动消化池运行,降低污泥厌氧消化效果。

(3) 由于工业废水源头重金属处理系统的不完善,我国部分城市污水处理厂污泥中含有较多的重金属,对厌氧微生物有毒害作用。

(4) 污泥厌氧消化工艺停留时间较长,通常要达到20~30d,造成厌氧消化池体积庞大,操作管理复杂。尤其在运行初期,产酸菌和产甲烷菌实现动态平衡时间较长。由于产甲烷菌对环境条件要求较高,初期培养困难,因此初期运行的主要目标就变成产甲烷菌的培养,需重点对有机负荷进行控制。如果有有机负荷过高,极易导致挥发性脂肪酸大量积累,抑制甲烷菌生长,从而延长试运行时间。

除了厌氧消化工艺本身,认知不到位也是造成厌氧消化工艺在国内应用较少的重要原

因。我国很多运行管理部门认为污泥厌氧消化的主要价值在于回收沼气，但由于有机物含量低，产生的沼气较少，仅仅通过沼气回收无法体现其经济效益，显得污泥厌氧消化处理对污水处理厂来说是一个多余的工艺。事实上，污泥厌氧消化可以去除 50%左右的有机物，其本质功能在于实现污泥的稳定化，这方面的价值要远远大于沼气产生的经济效益。

1.2.2 国外污泥厌氧消化技术应用

厌氧消化是目前国际上最为常用的污泥稳定化和资源化处理方法，同时也是大型污水处理厂最为经济的污泥处理方法。

欧洲的污泥厌氧消化始于 20 世纪 50、60 年代，大多用于大规模污水处理厂的污泥稳定。20 世纪 90 年代中期以前，污泥处理的主要目标是实现稳定化、去除异味及杀灭病原菌，使消化后的污泥经干化后可用于农业。之后由于严格限制重金属的新立法的出现，欧洲开始限制污泥用于农业，污泥焚烧比例增加，厌氧消化也逐渐成为焚烧的预处理工艺。通常，欧洲较多采用传统的中温厌氧消化，停留时间为 18~30d。

近年来，高温厌氧消化在欧洲采用也越来越多，其主要目的是改善污泥的卫生状况，缩短停留时间，增加产气速率。高温厌氧消化又可以分为单级高温消化和高温中温两级厌氧消化，两级消化中第一级高温厌氧消化采用 55~60℃，停留 2~3d；第二级中温厌氧消化采用 35~37℃，停留 12~15d。

目前欧洲国家约有 50000 座污水处理厂，年产污泥量 $4000 \times 10^4 \text{t}$ （以 80%含水率计），有 50%以上的污泥进行了厌氧消化稳定处理，据统计，整个欧洲共有超过 36000 座污泥厌氧消化反应池。^①其中，欧盟各国污泥厌氧消化在污泥处理中所占的比例如表 1-2-1 所示。

表 1-2-1 欧盟各国采用的污泥处理方法

国家	污泥处理方法所占的比率/%					
	浓缩	厌氧消化	好氧消化	脱水	堆肥	石灰法
比利时	53	67	22	60	0	2
丹麦	—	50	40	95	1	5
法国	—	49	17	—	0 ^①	0
德国	—	64	12	77	3	0
希腊	0	97	3	0	0	0
爱尔兰	14	19	8	33	0	0
意大利	75	56	44	90	0	0
卢森堡	—	81	0	80	5	0
荷兰	—	44	35	53	0	0
西班牙	—	65	5	70	—	26

① 有 17%的污泥用未知方法进行了处理，其中可能包括堆肥。

德国的城市污水处理厂总规模达到 $2800 \times 10^4 \text{m}^3$ ，污泥年产量为 $1000 \times 10^4 \text{t}$ （以 80%含水率计），污泥已经实现 100%的稳定化处理。服务人口大于 30000 人（规模约

9000m³/d) 的污水处理厂采用污泥厌氧消化稳定工艺。通过回收污泥中的生物质能源可以满足污水处理厂 40%~60% 的电耗需求, 碳减排效益十分明显。

在英国, 污泥厌氧消化的应用也较为普遍, 2007 年约 66% 的污水处理厂污泥采用厌氧消化处理, 预计到 2015 年将会增加到 85%。英国规划 2020 年可再生能源达到总能耗的 15%, 污水行业达到 20%, 并制定了有机物质厌氧消化设施的建设规划: 将回收近 9000×10⁴t 农牧业可降解废弃物, 1500×10⁴t 市政可降解固体, 750×10⁴t 污泥中的生物质能, 所有生物质能进行发电 (CHP) 或热能综合利用。

根据美国环保局的调查, 厌氧消化是美国污水处理厂最普遍采用的污泥稳定化工艺。美国有约 16000 座污水处理厂, 服务 2.3 亿人口, 日处理污水量 1.5×10⁸m³, 年产污泥量 3500×10⁴t (以 80% 含水率计)。现已建有 650 座集中厌氧消化设施处理 58% 的污泥, 对污泥进行稳定化并提高污泥的脱水性能, 其中 17% 的厌氧消化池可接纳油脂类废弃物 (FOG) 等高浓度有机废物。在采用厌氧消化的污水处理厂中, 有 85% 进行了沼气回收利用。所回收的能源一般用于污水处理厂内部使用, 有盈余时也对外输出, 其中, 49% 用于消化池加热, 27% 用于厂内供热, 22% 采用热电联产技术进行热能和电能回收, 能源回收进一步减少了发电所使用的化石燃料的温室气体排放。

日本的第一座污泥厌氧消化池 1932 年在名古屋投入运行。随后几年, 东京、大阪和京都等大城市也相继建成用于污泥消化的厌氧消化池。20 世纪 60、70 年代, 随着污水管网在日本的迅速普及和敷设, 厌氧消化技术在城镇污水处理厂也得到了广泛应用, 期间大约有 180 座城镇污水处理厂采用厌氧消化技术处理污泥。截至 2001 年, 日本已有 305 座污泥中温厌氧消化池, 其处理量占日本污泥总产量的 34.5%。近年来, 由于能源短缺和循环经济的需要, 政府和科研人员都开始重新审视污泥厌氧消化技术在可再生能源中的定位, 日本国会于 2002 年通过了《日本生物质综合战略》, 其中明确提出要开发厌氧消化技术等对含水率较高的生物质转化成能源的技术。受此政策的影响, 污泥厌氧消化技术在日本的应用也越来越普及, 同时通过在污泥预处理、高温厌氧消化和高温-中温组合厌氧消化等方面的大量研究, 不断改进厌氧消化技术。

第2章

污泥厌氧消化工艺

污泥厌氧消化工艺是在厌氧消化理论研究和应用基础上不断发展起来的。厌氧生物处理的机理主要涉及微生物学、生理生态学和生物化学等，这些理论研究对提高污泥厌氧消化处理效果，保障处理系统的稳定性和可靠性，具有十分重要的意义。本章详细介绍了污泥厌氧消化的生化基础和影响因素，并介绍了污泥厌氧消化的工艺类型及其发展。

2.1 污泥厌氧消化生化基础

2.1.1 污泥厌氧消化的阶段

污泥厌氧消化是指污泥在无氧条件下,由兼性菌和厌氧细菌将污泥中的可生物降解的有机物分解成 CH_4 、 CO_2 和 H_2O 等,使污泥得到稳定的过程。厌氧消化是由多种微生物参与的、多阶段的复杂生化过程,至今有多种理论来对其进行阐释,包括两阶段理论、三阶段理论、四阶段理论和四种群理论等,目前公认的是 Bryant 提出的三阶段理论。

长期以来,污泥厌氧消化被认为包括酸化阶段和甲烷化阶段两个阶段。固态有机物主要成分是天然高分子化合物,如淀粉、纤维素、油脂和蛋白质等,在无氧环境中降解为有机酸、醇、醛、水分子等液态产物和 CO_2 、 H_2 、 NH_3 、 H_2S 等气体分子,气体大多溶解在泥液中。该阶段的转化产物主要是有机酸,所以 pH 值迅速下降。低 pH 值有抑制细菌生长的作用,而 NH_3 的溶解产物 NH_4OH 有中和作用,经过长时间的酸化阶段, pH 值回升后,进入气化阶段。气化阶段产生的气体主要是甲烷,因此也称该阶段为甲烷化阶段,与酸化阶段相应。该阶段的 CO_2 也比较多,还有微量的 H_2S 。事实上,第一阶段的最最终产物不仅仅是酸,发酵产生的气体也并不都是从第二阶段产生的,因此,两阶段过程较为恰当的提法为非产甲烷阶段和产甲烷阶段。

随着对厌氧消化微生物研究的不断深入,厌氧消化中非产甲烷菌和产甲烷菌之间的相互关系更加明确。1979 年, Bryant 提出了三阶段理论,即包括水解酸化阶段、乙酸化阶段和甲烷化阶段。各阶段之间既相互联系又相互影响,各个阶段都有各自特色微生物群体,这是当前较为公认的理论模式。

第一阶段,有机物在水解与发酵细菌的作用下,使碳水化合物、蛋白质与脂肪,经水解和发酵转化为单糖、氨基酸、脂肪酸、甘油、 CO_2 和 H_2 等。

第二阶段,在产氢产乙酸菌的作用下,把第一阶段的产物转化成 H_2 、 CO_2 和乙酸。如戊酸的转化化学反应式,如式 (2-1-1) 所示:



丙酸的转化化学反应式,如式 (2-1-2) 所示:

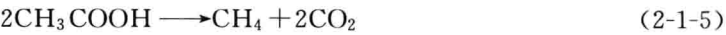


乙醇的转化化学反应式,如式 (2-1-3) 所示:



第三阶段,通过两组生理特性不同的产甲烷菌作用,将 H_2 和 CO_2 转化为 CH_4 或对

乙酸脱羧产生 CH₄。产甲烷阶段产生的能量绝大部分用于维持细菌生存，只有很少能量用于合成新细菌，故细胞的增殖很少。在厌氧消化过程中，由乙酸形成的 CH₄ 约占总量的 2/3，由 CO₂ 还原形成的 CH₄ 约占总量的 1/3，如式 (2-1-4) 和式 (2-1-5) 所示：



由以上可知，产氢产乙酸细菌在厌氧消化中具有极为重要的作用，它在水解与发酵细菌及产甲烷细菌之间的共生关系中，起到了联系作用，通过不断地提供大量的 H₂ 作为产甲烷细菌的能源，以及还原 CO₂ 生成 CH₄ 的电子供体。

三阶段厌氧消化的模式如图 2-1-1 所示。

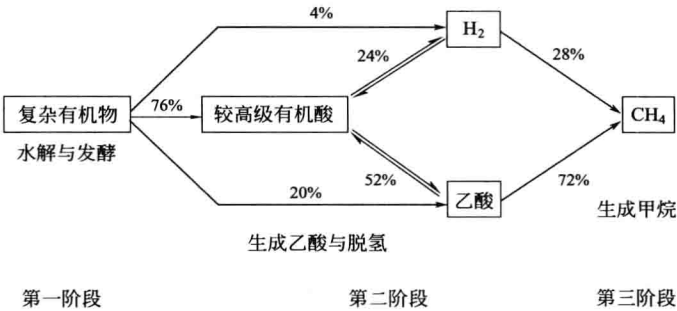
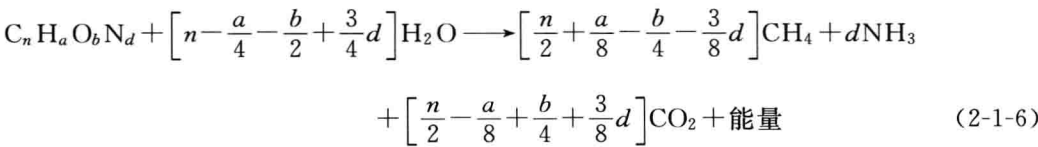
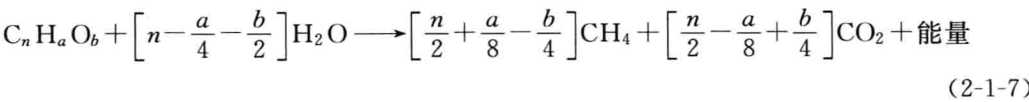


图 2-1-1 有机物厌氧消化模式

总之，厌氧消化过程中产生 CH₄、CO₂ 与 NH₃ 等的计量化学反应方程式为：



当 $d = 0$ 时，为不含氮有机物的厌氧反应通式，即伯兹伟尔（Buswell）和莫拉（Mueller）通式：



McCarty 和 Jeris 曾在 1963 年用原子示踪法研究了污泥厌氧消化过程中 CH₄ 的形成，其形成的百分率如图 2-1-2 所示。

2.1.2 污泥厌氧消化动力学

有机物的去除在厌氧条件下遵循一级反应动力学规律。由于甲烷发酵阶段是厌氧消化速率的控制因素，因此，厌氧消化反应动力学是以该阶段作为基础成立的。厌氧消化反应动力学方程式如下：