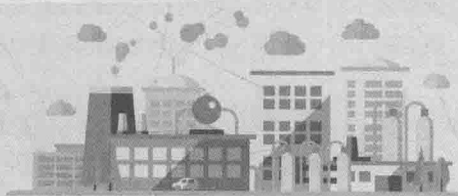


城市污泥与 工农业有机废弃物

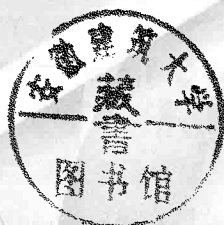
厌氧小分子碳源转化原理与技术

周爱娟 编著



城市污泥与 工农业有机废弃物 厌氧小分子碳源转化原理与技术

周爱娟 编著



化学工业出版社
· 北京 ·

本书在系统介绍城市污泥和工农业有机废弃物处理处置现状及其危害的前提下,论述了城市污泥和工农业有机废弃物的理化特征及物化预处理组合技术,秸秆、菌糠、酿造废弃物等作为外加碳源对城市污泥厌氧发酵小分子碳源转化的影响,并结合厌氧微生物学原理、功能微生物群落解析等手段,力图将理论与实践、基本原理与应用有机结合,最后对小分子碳源在微生物电催化系统中的能源转化方面的应用技术进行了论述。

本书适合环境科学、环境工程、市政工程等学科和专业的硕士生、博士生、高校教师,以及相关学科科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市污泥与工农业有机废弃物厌氧小分子碳源转化
原理与技术 / 周爱娟编著. —北京: 化学工业出版社,
2018. 1

ISBN 978-7-122-30847-4

I. ①城… II. ①周… III. ①城市-污泥处理②工业
废物-有机污染物-废物处理③农业废物-有机污染物-
废物处理 IV. ①X7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 259724 号

责任编辑: 徐 娟
责任校对: 宋 夏

装帧设计: 韩 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: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 11 彩插 4 字数 206 千字 2018 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

FOREWORD

近年来,随着工农业生产的快速发展和城市化进程的日益加速,我国的污水处理厂数目和污水处理量急剧增长。城市污泥是污水生物处理过程中的伴生产物,也是污水中污染物的浓缩体。若不加以处理和控制在,将会对环境造成严重的二次污染。面对如此巨大的污泥产量和增长率,城市污泥处理理应是污水处理流程中的重要环节之一,然而实际上长期“重水轻泥”的观念导致我国污水处理厂既无设施,也无预留地,高达80%的污泥只是脱水到一定含水率,交由第三方采用填埋或其他低末端端处理。污染物只是换了种存在状态(从液相中迁移到固相),不仅没有彻底消除,反而增加了处理难度。“脱水-填埋或不知去向”成为我国事实上的污泥处理处置路线。成为“负担”的污泥处理既对污水处理厂形成运营压力,也产生了更加严重的社会压力,因此,如何合理地处理和处置污水处理过程中产生的污泥是我国亟待解决的问题。

近年来,相比较传统的填埋和焚烧处理,从城市污泥中最大限度地回收有用资源成为研究热点。厌氧消化工艺是污泥稳定化、减量化和资源化首选的和最可行的途径。污泥经厌氧消化后,不仅体积大大减少,其中的有机碳化合物又可转化为高附加值小分子碳源或沼气,为污水处理厂提供脱氮除磷碳源或能源。然而,城市污泥的组成特点造成其中有机质比例失衡,蛋白质含量偏高,碳氮比(C/N)仅为6左右,严重低于厌氧消化工艺所需C/N比(10~20)。如何改善污泥厌氧消化性能、提高污泥有机质降解率、缩短消化停留时间已经引起了国内外学者的普遍关注。我国是世界第一农业大国,农作物秸秆资源的拥有量也居世界首位。以农作物为原材料的食品工业也带来很多的副产物,如菌糠、酿造废弃物等。如果以工农业有机废弃物为外碳源对城市污泥进行调质,可能对提高二者的资源化利用效率大有裨益。

本书基于以上的研究思路和理念,将作者从事城市污泥多年的研究成果汇总起来。全书共分为五章:第1章主要介绍城市污泥的研究现状;第2章介绍提高污泥溶胞和酸化性能的预处理方法;第3章以农业秸秆为外加碳源,介绍农业秸秆调质对污泥发酵产酸及蛋白质降解转化的影响;第4章以菌糠为外加碳源,介绍其投加对污泥共发酵产酸性能的影响;第5章以酿造废弃物为外加碳源,介绍了其与污泥共发酵的各项性能指标及变化情况。本书的部分内容来自笔者攻读博士

学位期间，协助导师王爱杰教授指导的硕士研究生郭泽冲、杜静雯和康灵玲的部分试验研究成果。王爱杰教授对笔者学术思想的形成给予了许多帮助，在此表示衷心感谢。温凯丽、刘芝宏、樊雅欣和魏瑶丽参与了全文的统稿和文字编辑，在此，对为此书的形成做出贡献的每个人表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足，恳请广大读者批评指正。

周爱娟

2017年7月

第1章 绪论

1

1.1 城市污泥资源化途径及研究现状	1
1.1.1 城市污泥的基本组成分析	3
1.1.2 城市污泥厌氧消化产甲烷	4
1.1.3 城市污泥生产生物燃料	5
1.1.4 利用微生物燃料电池产电	5
1.1.5 以污泥作为能源和原料生产水泥和建筑材料	7
1.2 城市污泥预处理研究现状	7
1.2.1 物理预处理	8
1.2.2 化学预处理	11
1.2.3 生物预处理	14
1.3 剩余污泥产酸发酵的研究现状	14
1.3.1 污泥厌氧处理的原理	14
1.3.2 污泥厌氧发酵的影响因素	15

第2章 提高污泥溶胞和酸化性能的预处理方法及策略

19

2.1 概述	19
2.2 超声预处理	19
2.2.1 超声频率对污泥溶胞率及颗粒性有机物溶出的影响	19
2.2.2 超声频率对短链挥发酸产量及分布的影响	22
2.3 微生物衍生型生物表面活性剂	27
2.3.1 挥发酸产量和组成影响	27
2.3.2 颗粒性有机物的水解	29
2.3.3 胞外水解酶活性及挥发酸累积机理解析	31
2.3.4 鼠李糖脂的可行性及原位合成分析	33

2.4	植物衍生型生物表面活性剂	35
2.4.1	剩余污泥厌氧水解过程的强化作用	35
2.4.2	污泥胞外聚合物的剥离分析	37
2.4.3	挥发酸产量及组成影响	39
2.4.4	皂苷促进污泥厌氧消化速率的机理解析	41
2.4.5	皂苷预处理的可行性分析	43
2.5	化学预处理	44
2.5.1	化学预处理对剩余污泥厌氧水解的影响	44
2.5.2	不同化学预处理剩余污泥厌氧发酵最佳产酸时间的 确定	51
2.5.3	化学预处理对半连续流厌氧发酵产酸效能的影响	63
2.6	本章小结	67

第3章 农业秸秆调质对污泥发酵产酸及蛋白质降解转化的影响 69

3.1	我国秸秆资源利用现状和本章概述	69
3.1.1	我国秸秆资源利用现状	69
3.1.2	本章概述	69
3.2	玉米秸秆调质比例及调质形式的优化	70
3.2.1	污泥水解及有机质浓度变化规律	71
3.2.2	蛋白质和碳水化合物浓度变化规律	72
3.2.3	VFAs产量及组成结构变化规律	74
3.2.4	氨磷的释放规律	77
3.3	污泥与玉米秸秆共发酵基质的厌氧消化动力学模型	78
3.3.1	模型的建立	78
3.3.2	模型参数求解	85
3.3.3	模型模拟结果分析与评价	88
3.3.4	模型应用	93
3.4	本章小结	97

第4章 菌糠投加对污泥共发酵产酸性能影响 99

4.1	双孢菇菌糠处理与处置现状	99
-----	--------------------	----

4.2	基于UD-RSM法优化预处理污泥与菌糠共发酵产酸工艺参数 ...	100
4.2.1	碱预处理污泥与菌糠共发酵产酸工艺参数优化.....	100
4.2.2	热碱预处理污泥与菌糠共发酵产酸工艺参数优化.....	102
4.2.3	超声预处理剩余污泥与菌糠共发酵产酸工艺参数优化 ..	109
4.3	污泥预处理对污泥与菌糠共发酵产酸性能提升的影响.....	112
4.3.1	溶解性有机质的变化	112
4.3.2	挥发酸产量及其组成的变化	115
4.3.3	氨氮和磷的释放规律	122
4.3.4	水解发酵过程中水解酶活性的变化	123
4.3.5	污泥减量化程度分析	125
4.4	不同共发酵体系产挥发酸经济性分析	127
4.5	本章小结.....	128

第5章 酿造废弃物投加对污泥共发酵产酸性能影响

130

5.1	概述.....	130
5.2	醋糟调质对剩余污泥发酵产酸及蛋白质降解的影响.....	131
5.2.1	醋糟性质.....	131
5.2.2	不同预处理醋糟对污泥发酵水解过程的影响.....	134
5.2.3	不同预处理醋糟对污泥发酵产酸过程的影响.....	137
5.2.4	污泥发酵过程甲烷累积产量的变化.....	142
5.2.5	污泥发酵过程中无机盐的释放	144
5.3	酿造废弃物调质对剩余污泥发酵产酸及蛋白质降解的影响	146
5.3.1	酿造废弃物组分	146
5.3.2	不同酿造废弃物对污泥发酵水解过程的影响.....	147
5.3.3	不同酿造废弃物对污泥发酵产酸过程的影响.....	151
5.3.4	污泥发酵过程甲烷累积产量的变化.....	155
5.3.5	污泥发酵过程中无机盐的释放	156
5.4	本章小结.....	157

参考文献.....	160
-----------	-----

1.1 城市污泥资源化途径及研究现状

目前,在城市污水处理厂建设力度逐步加大的同时,城市污泥产生量也随之激增,如何经济、安全、合理地处理处置和利用污泥是当今十分受关注的研究课题。根据国家“十二五”规划要求,《全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》(国办发〔2012〕24号)内容强调,到2015年,全国城镇污泥无害化处理处置率达到70%以上^[1]。然而,中国城镇供水排水协会发布的《我国城镇供水排水行业发展情况报告》内容显示,至2012年底,我国的污泥处理处置设施建设严重滞后,规模仅完成26.9%,污泥安全处理率不足10%。污泥随意堆放及所造成的污染与再污染问题已经再一次凸显出来。另一方面,城市污泥中蕴含丰富的有机质及矿质元素,如何最大限度地回收污泥中有用的资源,对于实现国家循环经济和可持续发展战略需求有重大的意义^[2]。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中明确提出,在环境、资源、能源三个重要领域,将“综合治污与废弃物循环利用”作为优先主题及任务要求^[3,4]。国务院发布的《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年)》指出,针对生物质能等能源科学领域,强调“以解决人类社会可持续利用能源的科学问题为目标,……为能源科学的新突破和节能减排技术变革提供支撑”。

污泥处理、处置或资源化利用方式主要包括:填埋、焚烧、土地利用、制砖、热能利用、制取活性炭、排海等^[5,6]。填埋法的致命缺点是工程大、耗费土地,可供填埋的场地日渐减少,且极易污染周围水源,引起二次污染、易引起沼气爆炸;由于污泥中的含水量大,焚烧成本很高,如果燃烧不充分还会污染大气;排海会危害海洋生态系统,威胁人类的食物链,造成没有国界的污染,美国及欧盟国家已禁止将污泥向大海投弃。对于污泥农用,由于污泥的理化性质还与

有机肥有较大差距，存在大量的病虫卵、病原微生物、重金属、不明有毒难降解有机物和难闻臭气，虽然美国、日本、英国等一些发达国家有很多应用案例，但在我国无论是政策层面还是行业技术导则层面都持限制态度并力图取缔，因此，在开发污泥土地利用技术时对污泥农用仍需谨慎。随着城市污泥产量的逐渐增多，我国已开始将污泥直接干燥成型或造粒，制成有机颗粒肥、有机复混肥和有机微生物肥料等用于土地填埋和城市绿化。我国是农业大国，发展污泥土地利用（不包括污泥农用）不仅符合国家可持续发展的战略需求，而且具有巨大的市场前景。近年来，对剩余污泥资源化途径的研究越来越广泛，图1-1总结了近年来文献报道的各种污泥资源化途径。

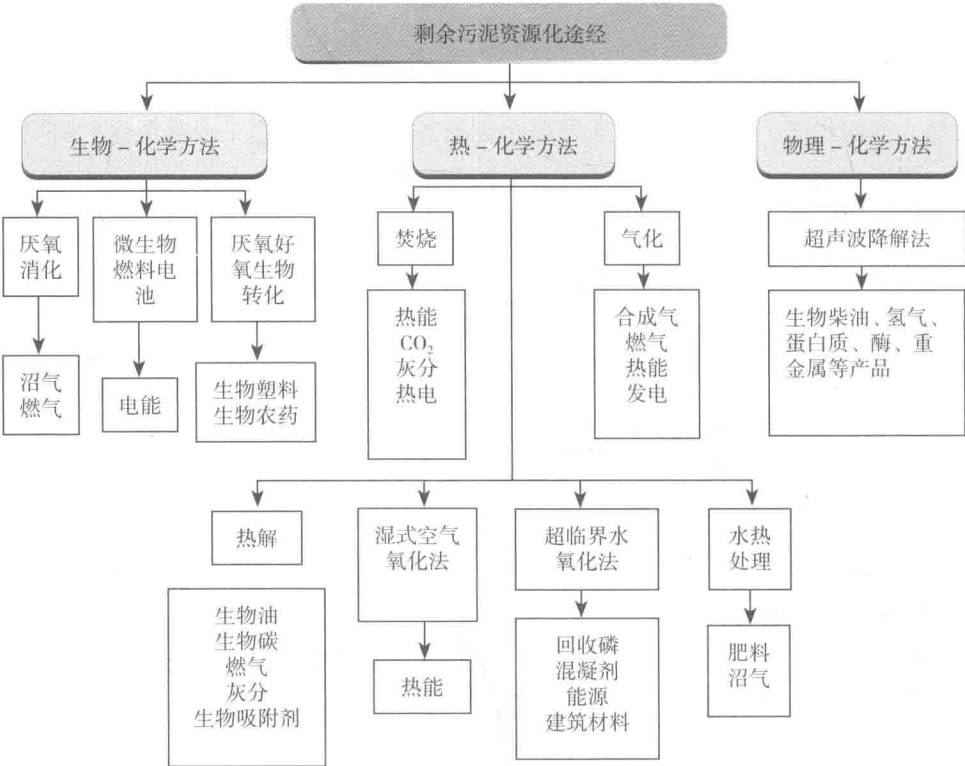


图1-1 城市污泥资源化途径

利用污泥这种廉价的底物生产附加值更高的生物化学品将成为污泥资源化的新途径。挥发性脂肪酸（VFAs）是研究较多的生物化学品之一，这些挥发性短链脂肪酸不仅可以进一步发酵生成甲烷，为污水处理厂提供能源，也可以使其积累作为有机碳源被脱氮除磷菌利用以去除富营养化污水中的氮和磷，这对南方污水厂普遍存在碳源不足的问题具有一定的实际意义。另一方面，大量的剩余污泥

可在污水处理厂内部实现资源化利用,也可以进一步节约剩余污泥的运输等方面的成本。综合以上分析,开发高效污泥处理技术,形成优质、稳定、安全的污泥有机肥产品,是发展污泥土地利用的核心技术,对实现污泥资源化利用具有极大的应用价值和社会意义。

1.1.1 城市污泥的基本组成分析

为了更好地对剩余污泥能量循环利用进行评价,分析剩余污泥的组成成分是非常有必要的。大体上污泥主要由6部分组成:(1)无毒性的有机碳化合物(大约占干重的60%),大部分来源于微生物^[7];(2)包含氮、磷的化合物;(3)有毒的无机污染物和有机污染物[包括重金属,如Zn、Pb、Cu、Cr、Ni、Cd、Hg和As(含量变化范围从高于 1000×10^{-6} 到低于 1×10^{-6});多氯联苯(PCBs)、多环芳香烃(PAHs)、二噁英、农药、烷基磺酸盐、壬基苯酚、溴化阻燃剂等];(4)病原体及其他微生物污染物;(5)无机物,如硅酸盐、铝酸盐以及包含钙、镁的化合物;(6)水,变化范围从微量到95%以上。未处理/消化污泥的典型化学组成和特性见表1-1^[8]。

表1-1 未处理/消化污泥的典型化学组成和特性

项目	未处理污泥	消化污泥
TS/%	2.0~8.0	6.0~12.0
VS/TS/%	60~80	30.0~60.0
脂肪/TS/%	6.0~30.0	5.0~20.0
蛋白质/TS/%	20.0~30.0	15.0~20.0
N/TS/%	1.5~4.0	1.6~6.0
P/TS/%	0.8~2.8	1.5~4.0
K/TS/(K ₂ O, %)	0.0~1.0	0.0~3.0
纤维素/TS/(%)	8.0~15.0	8.0~15.0
Fe(非硫化物)/%	2.0~4.0	3.0~8.0
Si(SiO ₂)/TS/%	15.0~20.0	10.0~20.0
碱度(CaCO ₃)/(mg/L)	500~1500	2500~3500
有机酸(HAc)/(mg/L)	200~2000	100~600
pH值	5.0~8.0	6.5~7.5

污泥处置的基本问题在于其是一种混合物,并同时含有上述所有物质,如此复杂的特性让其在处理的同时并必须兼顾所有问题成为所有处理处置方法的难题^[9]。这其中,占有绝大部分的存在于无机物中的有机碳、磷和氮化合物均可以作为一种有价值的化合物^[10]。可持续处理含有这些元素的物质并实现资源循

循环利用，可进一步实现剩余污泥及其处理后的残渣对环境 and 人类负面影响的最小化。在资源化处理之前，由于运输、处置和处理效率等因素，剩余污泥通常需要进行脱水处理。与废水相比，污泥中含氮化合物的含量较低。污泥中磷的含量主要取决于废水处理的工艺类型，污水处理过程几乎浓缩全部的磷，前期研究证明，采用各种处理方法从污泥中直接回收磷也是可行的^[10~12]。

可以预见，剩余污泥创新性处理处置的研究主要集中在以下三个方面：污泥中有价值组分的循环回收利用；解决污泥中的有毒物问题；合理的处理处置所需费用^[13]。简言之，剩余污泥（有机物）能量回收利用技术可以进一步细化为4类：（1）剩余污泥厌氧消化产甲烷；（2）剩余污泥生产生物燃料；（3）微生物燃料电池利用剩余污泥产电；（4）以污泥作为能源和原料生产水泥和建筑材料。

1.1.2 城市污泥厌氧消化产甲烷

厌氧消化通常用于剩余污泥的稳定化，并将部分挥发性化合物转化为沼气^[14,15]。沼气可以作为废水处理厂自身或者其他方面的能量来源。目前，剩余污泥厌氧消化主要应用于大中规模的废水处理厂，然而，厌氧消化处理在小型污水处理厂的应用也受到越来越多的关注。具体污泥厌氧产甲烷的条件及产量见表1-2。

表1-2 剩余污泥厌氧产甲烷综述

参考文献	条件	产量
Zhang等 ^[14]	持续碱处理（pH=10，8d） EGSB处理发酵液	12.43m ³ CH ₄ /（m ³ 反应器·d）
Zhang等 ^[15]	持续碱处理（pH=10，8d）	398mLCH ₄ /gVSS
Nges和Liu ^[16]	中温（37℃），SRT12d 高温（50℃），SRT12d	0.314m ³ CH ₄ /（kgVS·d）（标准状态下） 0.348m ³ CH ₄ /（kgVS·d）（标准状态下）
Guo等 ^[17]	MEC反应器，1.4V MEC反应器，1.8V	137mLCH ₄ 163mLCH ₄

中温（35℃）厌氧消化是目前实践应用规模最大的厌氧工艺，在厌氧消化反应器中，污泥停留时间大约为20d^[16,18]。沼气的产量主要依赖于污泥类型和反应器运行条件，产气量大约为1m³/kg有机物。高温厌氧消化工艺也在污泥的资源化和减量化处理中应用较广^[19~21]，与中温消化相比，高温处理具有以下优势：高沼气产量；较高病原体灭活率；高有机固体降解率和较短污泥停留时间。厌氧消化技术可以使有机物减量达到大约20%~30%。采用适当的物理、化学、热、机械或者生物预处理技术可以有效地增加沼气产量，如高温热水解、微

波加热处理、超声、臭氧、酶、液体射流、碱水解、高性能脉冲技术和湿式氧化等^[22~24]。预处理技术的潜力是提高厌氧生物降解效率并最终实现增加沼气产量。另外,预处理的优点还包括降低反应后需要后续处理或者填埋处理的脱水污泥的产量。为了对预处理技术的可行性进行评价,对沼气产量、总能量平衡、最终污泥量以及成本都要加以考虑和分析。厌氧消化工艺仅能部分去除有毒有机化合物,除残留的有毒有机物外,消化后污泥还含有重金属、溶解性的磷和无机物。为了获得彻底的解决方案,对消化后的污泥进一步处理是非常有必要的,如对其脱水、焚化干污泥,处理污泥上清液。然而,剩余的残渣能量回收率极低,这意味着对其进行焚烧回收能量已变得不那么具有吸引力。

1.1.3 城市污泥生产生物燃料

许多关于生物转化过程论文提及生物质可用于生产液态或气态能源。Claassen等人针对这个转化过程进行了详细的论述^[25]。微生物转化过程的一般工艺方案主要集中在能源生产,主要包括以下三个阶段。第一阶段,即预处理阶段,是为了让底物更易于生物转化的阶段。基于预处理工艺的必要性,可能采用的预处理技术有蒸汽处理、酸或者碱水解、酶处理、超声处理等或者结合一种或多种方法的预处理技术。发酵阶段,即生物转化阶段,通常为优化工艺条件将其分为互相联系的两个阶段。发酵阶段结束后,进入必要的后续处理阶段。产生能源的载体类型很大程度上取决于微生物的类型和应用的工艺条件。根据微生物的类型、能量载体,可以生产如甲烷、乙醇、丙酮、丁醇或氢。在前面的论述中介绍过,这个工艺已经在世界范围内进行了大中小规模的应用。

目前,利用剩余污泥生产乙醇、丁醇或丙酮的研究较少。其中一个原因可能是由于分离这些产物需要复杂的分离系统。多数研究集中在利用剩余污泥产氢^[26,27]。然而,到现在为止研究结果并不理想,考虑到产甲烷途径简单且大量的甲烷生产工艺经验,在短期内剩余污泥产氢是否会比产甲烷是否更具吸引力受到质疑。目前,在传统厌氧处理的基础上对工艺进行改进,或采用新兴工艺如微生物燃料电池处理剩余污泥产氢,受到部分研究者的关注^[28,29]。

1.1.4 利用微生物燃料电池产电

在包含有可生物降解的有机物废水中可以利用微生物燃料电池直接生产电能。

图1-2为微生物燃料电池示意。基本上，微生物燃料电池由被一个阳离子交换膜分开的阳极室和阴极室组成^[30]。废水中的碳水化合物等有机物在阳极室被一些特殊的微生物氧化分解。

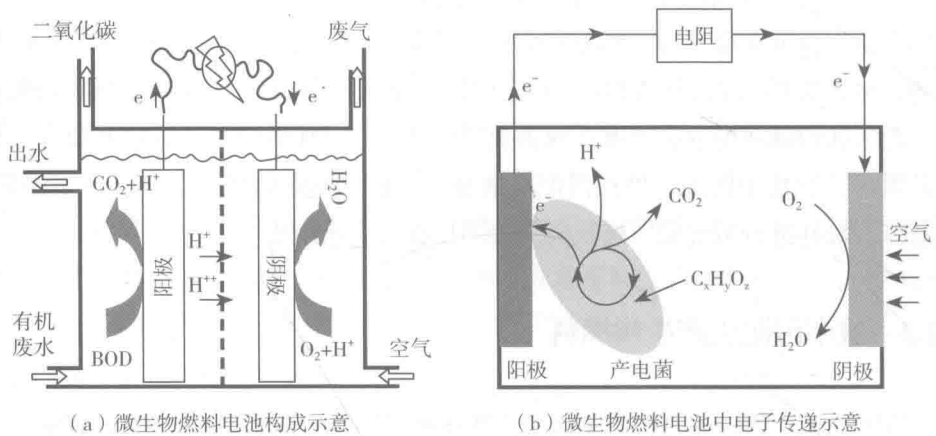


图1-2 微生物燃料电池示意

已有证明微生物燃料电池的原理可以应用于市政污水（主要为出水）。上述试验中使用的微生物燃料电池是一种单室型微生物燃料电池。但是相对于产生电能的效率小于12%。Dentel等人研究了将微生物燃料电池应用到剩余污泥的可能性^[31]。在研究中，他们采用有效体积为几升的污泥单室反应器，石墨电极放置在顶部充气（有氧）区和厌氧污泥区的底部，最大电流大约为60 μ A，可获得几百毫伏的电压。虽然试验的初步结果令人满意，但是工艺适用于剩余污泥的大规模处理仍然需要进行更深入的研究。这存在很多原因，其一，污泥中不是所有的有机物都是可生物降解且适于生物转化发电的。采用物理、化学或者微生物预处理污泥可以增加有机物的碎片，从而提高生物转化率。从这方面考虑，通过预处理提高污泥厌氧消化工艺中沼气产量的经验是非常有益的。污泥中含有大量的胶体粒子和聚合物，能够吸附在几乎所有类型的物质的表面，从而阻塞微生物燃料电池的内部结构。再者，这些物质会阻碍反应器中污泥物质的氧化进程。污泥中包含大量有毒的无机物和有机物，同时还含有大量无毒的无机物。由于目前针对有毒有机物的危害尚不清楚，因此仅仅采用微生物燃料电池还不能对污泥进行彻底处理，对剩余的残渣进一步处理是有必要的。应用剩余污泥直接发电的吸引力不仅取决于微生物发电工艺本身，还取决于这项工艺的污泥残渣产量和组成。

1.1.5 以污泥作为能源和原料生产水泥和建筑材料

热解是污泥（生物质）在温度为350~500℃的有氧条件下进行的高温压力过程^[32]。在这个过程，污泥转化为小分子碳源、灰、热解油、水蒸气和可燃性气体。热解过程焚化部分固体、气体产物，并用在热解过程中所用的加热能量。该工艺存在的一些改进取决于所使用的设备和运行条件。气化伴随着干污泥（或生物质）转化为灰分，随着氧气的减少，可燃性气体的温度可以达到1000℃^[33]。并且热处理技术包含热解和气化这两方面的结合。尽管关于剩余污泥的热解和气化的研究非常有限，很多关于生物质热解和气化的研究还是持续地进行着。热解/气化工艺在实践应用中比较成功的案例是利用剩余污泥生产可以作为燃料的油。在包含大量运行单元的工艺中，污泥颗粒在450℃的有氧条件下加热干燥，有机物转化为碳、油和不凝性蒸气。这些蒸气与碳混合转化为直链的碳水化合物，然后进一步凝结为油。碳作为气化反应器的能量来源或者用作肥料。

剩余污泥中以包含有机碳的化合物和无机化合物作为有价值物质，有几种可能有效的途径利用这些化合物。特别是在日本，大量的精力已投入到通过热凝固污泥无机化合物生产有价值的产品。这项工艺可以将焚烧灰烬、污泥燃烧后产物或者干燥污泥在高达1000℃的高温条件下固化，破坏了有毒有机化合物，废热可以同时用于污泥干燥工艺。生产如人造轻集料、矿渣和砖等多种产品取决于特殊工艺的改进和应用的运行条件。特别是日本，在这些公益运行中积累了大量经验^[34]。通常，在生产工艺中能量效率不是非常高，成本很高，目前在实践中非常有限。另一个有利途径是利用污泥中的无机和有机化合物生产水泥^[35]。这项工艺是以灰分或者干污泥为原料，已经应用于实践中。由于在高温条件下，污泥中的有毒有机污染物彻底被氧化，重金属被固定在水泥中。通常，被用作原料的灰分或干污泥的量仅占所用的原料总量的百分之几。

1.2 城市污泥预处理研究现状

剩余污泥中微生物细胞壁属于生物难降解物质，呈半刚性结构，严重阻碍了胞内有机物的溶出和水解，进一步影响了污泥厌氧消化的降解速率，因此，高效的预处理技术是污泥资源化利用的前提。

1.2.1 物理预处理

1.2.1.1 热处理

热处理早在1970年便被用于提高污泥的脱水性能。热处理一般是指将污泥温度加热到150~200℃，与之相对应的压力通常为600~2500kPa。经过热处理后的污泥，其胶体结构被破坏并释放出污泥絮体内部和细胞内部的间隙水^[36]，与此同时，细胞内的有机物也随之被释放出来。

近年来，对污泥进行热处理以获得大量溶解性的易降解有机物，从而补充污水处理过程中不足的碳源成为了研究热点。同时，基于热预处理的一些商业化污泥处理工艺逐渐开发，并用于污泥的处理。例如，挪威Cambi公司开发了一套热水解系统，在180℃处理30min条件下，处理后的污泥溶胞率可达30%，相应的产气量提高150%。Veolia公司的水务子公司Krüger公司亦开发出相似的热处理装置，以BioThelys[®]系列出售。另外，很多研究者在采用热预处理提高污泥厌氧消化性能方面做过很多研究，采用的处理条件和主要的结果见表1-3。

表1-3 热预处理综述

参考文献	条 件	结 论
Hiraoka等 ^[37]	60~100℃	60℃气体产生量最大
		100℃VS减少量最大（5%~10%）
Pinnekamp ^[38]	120~220℃	ODS降低10%~55%（WAS）
		ODS降低7%~34%（PS）
		170℃气体产生量最大 产气量与处理温度呈反比
Li和Noike ^[39]	62~175℃， 30~60min	剩余污泥溶胞率（25%~45%），90℃溶胞率最大（170℃，60min）
Kim等 ^[40]	121℃，30min	VS减少率提高30%
Valo等 ^[41]	170℃，15min	TS减少率提高59%
		产气量提高92%
Ferrer等 ^[42]	70℃，19~72h	与产甲烷呈负相关关系
		采用高温消化
		高温（110~134℃）没有任何效果
Climent等 ^[43]	70~134℃， 90min~9h	采用高温消化
		70℃，9h产气量提高50%
		高温没有效果

续表

参考文献	条 件	结 论
Bougrier等 ^[44]	135 ~ 190℃	190℃甲烷产生量提高25%
Tanaka等 ^[45]	180℃, 60min	甲烷产量提高90%
		VSS减少率提高30%

污泥的热处理不应仅仅被看作是促进污泥溶解的一种方法。在微生物细胞溶解的同时,污泥的脱水性能也得到了提高,此外还达到了污泥灭菌的目的。污泥在脱水后,其热水解过程所产生的易于生物降解的有机物都溶解在水解液中,因此热处理也可以被认为是污泥稳定的一种方法。

1.2.1.2 超声预处理

利用超声波在液体中传播时产生的空化作用破解污泥絮凝体、菌胶团和细胞体。该方法可认为是多种作用效果的综合。

Tiehm和Neis等人利用3kHz、3.6kW的超声波处理污泥64s,污泥中SCOD由63mg/L增加到2270mg/L,而且使后续厌氧消化的SRT(固体停留时间)由22d缩短至8d,生物气产量明显增大^[46]。F. Wang等人研究了超声破解污泥释放进入液相的组分,发现超声破解后,污泥的SCOD增加较多,溶液中的蛋白质、DNA、Ca²⁺和Mg²⁺浓度都相应增加^[47]。Q. Wang等人研究超声波预处理污泥对厌氧消化的影响,结果发现利用9kHz、200W超声波处理污泥10~40min,破解时间在10~30min内,污泥的COD浓度、蛋白质浓度和碳水化合物浓度都随着破解时间的延长增大较快,而破解时间为40min时,污泥中各物质浓度增大趋缓;破解时间在10~30min内,厌氧消化时累计产气量增大明显,而40min时,累计产气量增大较小^[48]。Tiehm和Zeilhorn等人的研究结果也证明超声破解后的污泥厌氧消化时,VS降解率由21.5%增加到33.7%,生物气产量增加了41.6%。C. P. Chu和D. J. Lee等人的研究也得到了相似的结论^[49]。其他超声预处理研究见表1-4。

表1-4 超声预处理综述

参考文献	条 件	结 论
Yan等 ^[50]	20kHz; 10min; 1.0kW/L	SCFAs _产 量3109.8mgCOD/L
		溶解性总蛋白质2030.9mgCOD/L
		溶解性总糖383.0mgCOD/L
Liu等 ^[51]	28kHz; 60min; pH=3.0	SCFAs _产 量1700mg/L
	28kHz; 60min; pH=12.0	SCFAs _产 量3700mg/L