

废水厌氧生物处理工程

FEISHUIYANYANGSHENGWUCHULIGONGCHENG

高等学校“十二五”规划教材



市政与环境工程系列研究生教材

主编 万松 李永峰 殷天名
主审 陈瑛

高等学校“十二五”规划教材
市政与环境工程系列研究生教材

废水厌氧生物处理工程

主编 万松 李永峰 殷天名
主审 陈瑛

哈爾濱工業大學出版社

内容简介

全书共分 10 章,分别对厌氧生物处理过程微生物、厌氧过程的有机物转化、厌氧生物处理过程的控制、厌氧生物处理工程的设计等进行了全面论述和介绍。本书不仅详细阐述了厌氧消化的基础理论,而且较全面地论述了目前国内外现有的废水厌氧生物处理工艺的工作原理、运行特性和设计方法,并详细地介绍了厌氧生物技术对含有不同有机废物的各种工业废水的处理方法。

本教材可作为市政工程、环境工程、环境科学等专业研究生和高年级本科生的教材,也可作为相关专业的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

废水厌氧生物处理工程/万松,李永峰,殷天名主编. —哈
尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013. 10
ISBN 978-7-5603-4241-2

I . ①废… II . ①万… ②李… ③殷… III. ①废水处理 - 厌
氧处理 - 高等学校 - 教材 IV . ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 231610 号



策划编辑 贾学斌
责任编辑 李广鑫
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传真 0451-86414749
网址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 420 千字
版次 2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷
书号 ISBN 978-7-5603-4241-2
定价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《市政与环境工程系列研究生教材》编审委员会

名誉主任委员：任南琪 杨传平

主任委员：周 琪

执行主任委员：李永峰 施 悅

委员（按姓氏笔画顺序排列）：

马 放	王 鹏	王文斗	王晓昌
王爱杰	田 禹	冯玉杰	刘广民
刘文彬	刘鸣达	刘勇弟	孙德志
那冬晨	李玉文	李盛贤	吴晓芙
汪群惠	张 颖	陈兆波	林海龙
季宇彬	周雪飞	郑天凌	赵 丹
赵庆良	赵晓祥	施 悅	姜 霞
徐春霞	徐菁利	唐 利	黄民生
曾光明	楼国庭	蔡伟民	蔡体久
颜涌捷			

《废水厌氧生物处理工程》编写人员名单与分工

主编：万 松 李永峰 殷天名

主审：陈瑛

编写人员：李永峰、殷天名：第1章；

万 松：第2章、第9章；

谢静怡、李永峰：第3章～第4章；

李巧燕、李永峰：第5章～第6章；

刘瑞娜、李永峰：第7章～第8章；

殷天名：第10章。

文字整理和图表制作：王玥、廖苑如、刘希、汤湘

前　　言

厌氧处理技术的发展已有百余年历史,近些年来,这项技术日益为国人所认识。我国水资源的匮乏和水污染的严重现状使我国科研、管理和工程技术人员认识到发展水污染防治新技术的迫切性和重要性。

但以往人们比较重视废水好氧生物处理技术,而废水厌氧生物处理技术的专著相对较少。1881年人类开始研究厌氧污水处理技术,但直到20世纪70年代,为了解决日益加重的能源短缺问题,人们才开始把精力大量投入到废水厌氧处理技术上,使废水厌氧生物处理的理论与技术取得了突破性的进展,在解决高浓度有机废水和废弃物的处理与利用方面发挥了不可替代的作用。厌氧生物技术又一次受到国内外科技工作者的青睐。

本书参考了国内外大量有关废水厌氧生物处理的基本理论、工艺机理、设计计算和检测方法等方面的文献资料,由于这些资料来源渠道较多,很多作者没有联系方法,因此不能一一致函或致电感谢,在此一并对给我提供文献和对学术方面有益的众多专家学者和同行们表示最诚挚的感谢,正由于他们才能使本书有较为系统、全面的论述。同时,也诚望各位读者在使用过程中提出宝贵意见,使用本教材的学校可免费提供电子课件,若需要可与李永峰教授联系(mr_lyf@163.com)。本书的出版更得到了“东北林业大学优秀专著出版基金(2010)”和“上海市科委重点科技攻关项目(No.071605122)”“上海市教委重点课程建设项目(s2007010004)”“上海市教委重点科研项目(07ZZ156)”和国家“863”项目(No. 2006AA05Z109)\国家“973”项目(No. 2007CB512608)的技术成果和资金的支持,特此感谢!

由于编者业务水平和编写经验有限,书中难免存在不足之处,希望有关专家、老师及同学们随时提出宝贵意见,使之更臻完善。

编　　者

2013年7月1日

目 录

第1章 废水厌氧生物处理概论	1
1.1 水污染与废水厌氧处理	1
1.2 厌氧消化的基本原理	3
1.3 厌氧生物处理技术的优缺点	6
1.4 厌氧生物处理工艺的发展概况	9
第2章 废水生物处理微生物学	15
2.1 发酵细菌群	17
2.2 产氢产乙酸菌群	20
2.3 同型产乙酸菌	22
2.4 产甲烷菌及其作用	25
2.5 硫酸盐还原细菌	39
2.6 细菌种群间关系	41
第3章 有机污染物的厌氧生物转化	44
3.1 有机污染物厌氧生物转化的基本原理	44
3.2 基本营养型有机物的厌氧生物降解途径	49
3.3 非基本营养型有机物的厌氧生物降解途径	58
3.4 有机物生物转化后的环境效应	59
第4章 厌氧消化过程的控制条件	61
4.1 厌氧消化过程的酸碱平衡及 pH 值控制	61
4.2 温度对厌氧生物处理的影响	64
4.3 厌氧消化过程中的氧化还原电位	67
4.4 废水特性	69
4.5 厌氧污泥的活性	77
4.6 负荷率与发酵	82
4.7 接触方式	84
第5章 厌氧生物反应器	87
5.1 基质降解和微生物增长表达式	87
5.2 动力学基本方程	90
5.3 升流式厌氧污泥层反应器(UASB)	92
5.4 连续流式混合搅拌反应器(CSTR)	99
5.5 厌氧生物膜法	109
5.6 其他厌氧生物反应器	116

第6章 废水厌氧处理的后处理工艺	121
6.1 后处理工艺概述	121
6.2 废水中病原微生物和营养物的浓度	122
6.3 稳定塘的后处理	123
6.4 活性污泥法后处理	126
6.5 硫化物的生物氧化方法	133
第7章 两相厌氧生物处理工艺	140
7.1 两相厌氧工艺概述	140
7.2 相的分离	157
7.3 工艺的研究与应用	163
第8章 污泥厌氧消化处理	176
8.1 污泥的分类及性质	176
8.2 污泥厌氧消化工艺流程及消化池构造	192
8.3 厌氧消化系统的运行与控制	214
8.4 化学物质对厌氧消化系统的影响	222
第9章 各类工业废水厌氧处理技术	232
9.1 食品与发酵工业废水的厌氧处理	232
9.2 制浆造纸工业废水的厌氧处理	243
9.3 含硫酸盐废水的厌氧处理	247
9.4 其他难降解工业废水的厌氧处理	252
第10章 厌氧生物处理的实验室研究和分析方法	256
10.1 沼气的测定	256
10.2 挥发性脂肪酸的测定	259
10.3 碱度的测定	260
10.4 COD 的测定	262
10.5 硫酸盐和硫化物的测定	263
10.6 总氮、氨态氮和有机氮的测定	263
10.7 总固体、挥发性固体、总悬浮物、挥发性悬浮物和灰分的测定	267
10.8 厌氧污泥的产甲烷活性测定	268
10.9 厌氧生物可降解测定	270
10.10 产甲烷毒性的测定	273
10.11 反应器内污泥量的测定	276
参考文献	277

第1章 废水厌氧生物处理概论

经济的发展总是伴随资源的消耗与能源的短缺,近30年来,能源问题尤其突出,由此引发的环境问题不但阻碍了人类前进的步伐,甚至已经威胁到包括人类在内的全球各物种的生存,严峻程度已不容忽视。以厌氧生物处理方法处理废水,可以有效地缓解水资源与能源之间的矛盾。

一直以来应用的传统废水好氧生物处理方法的实质,是用大量的能耗换取水资源的再生,发达国家用于处理废水的电耗已占到全国总电耗的1%左右,是一种耗能型废水处理技术,这种高能耗、低收益的方法是世界各国尤其是第三世界国家难以承受的。人们正在积极地通过不断研究和探索以期得到一种高效率、低能耗的新型废水处理技术,而厌氧生物处理技术的低能耗使其成为好氧生物处理技术的替代技术。

厌氧生物处理工艺并不是新近发现的生物处理方法,在众多的废水处理生物工艺中,人们重新认识到了采用厌氧生物处理工艺处理有机废水和有机废物的重要性,希望能把厌氧生物法作为好氧生物法的一种可替代处理工艺。厌氧生物处理技术不仅可以减少好氧生物处理技术的耗能,其有机物转化产物——沼气及氢气,又可作为替代传统不可再生化石燃料——煤和石油的新型清洁能源。通过各国学者不断努力,厌氧生物处理技术有了很大的突破,以往的厌氧生物处理技术只能处理高浓度有机废水,且需要对原始废水进行增温处理,耗能较高,收效较低;现今的厌氧生物处理方法不但能处理高、中等浓度有机废水,还成功地实现了处理低浓度有机废水的可能性,为废水处理方法提供了一条高效能、低能耗,并符合可持续发展原则的治理废水途径。

近30年来,能源的短缺和生产的发展促进了废水厌氧生物处理工艺的飞速发展,不但在厌氧微生物学和生物化学等基础研究方面取得了长足的进步,还成功开发了一批新型废水厌氧生物处理工艺,彻底改变了过去人们认为厌氧生物法只能在高温条件下低效处理高浓度废水的刻板印象。新开发的现代废水厌氧生物处理反应器不仅效能高,并且可以在常温条件下处理中低浓度的有机废水。

1.1 水污染与废水厌氧处理

纵观世界经济发展历程,我们不难得出这样的结论:为实现经济的持续稳定发展,必须解决好发展与环境保护的矛盾,而近代工业的飞速发展所产生的严重环境问题已经直接或潜在地威胁着人类的生存和发展。尽管地球表面70%的面积被水覆盖,但可直接应用的淡水资源仅占总体水资源的0.0027%,全球化工业的飞速发展又带来大面积的水污染,严重破坏水环境,威胁生态环境。

我国水污染情况也十分严峻，90% 的城市河段水质污染超标，全国范围内的七大水系超过一半的河段污染严重，其中以海河、辽河、松花江和淮河流域的污染尤为严重，淮河流域 191 条支流中的 80% 支流水体呈现黑绿色，一半以上的河段已完全丧失使用价值，不少工厂因此停产，部分地区农作物绝收。而长江、黄河、珠江等也存在污染严重的河段，影响当地人民的生产生活。因水污染而引发的特大事故，已经给苏、皖等多省当地居民带来忧患，因水污染而导致的停工、停产、限产事件频频发生，癌症等多类疾病的患病率也呈逐年上升趋势，成为影响社会稳定的重要因素。

废水中的有机物是造成水污染的最重要污染物，它们不但使水质恶化，当中的有毒化合物还会造成更为严重的生产生活事故。因此对废水有机物的处理是控制水污染的重要工作之一。废水主要分为工业废水、农业废水和生活废水三大类。工业废水指工业生产过程中产生的废水和废液，其中含有随水流失的工业生产用料、中间产物、副产品以及生产过程中产生的污染物；农业废水指农作物栽培、牲畜饲养、农产品加工等过程排出的废水；生活废水是指城市机关、学校和居民在日常生活中产生的废水，包括厕所粪尿、洗衣洗澡水、厨房等家庭排水以及商业、医院和游乐场所的排水等。

废水的组成结构对废水处理方法的选择有重要的意义，不同来源的废水其成分有较大的差异，在处理方法的选择上亦有不同，这主要取决于废水的性质。有机废水的性质主要为 3 类：易于生物降解的，难生物降解的和有害的。

易于生物降解的这类废水主要来自以农牧产品为原料的工业废水和禽畜粪便废水等。这类废水数量大，有机物浓度很高，对环境污染较为严重。对这类废水的处理除首先考虑回收有用物质外，还应优先考虑采用厌氧处理技术，不仅效能高、能耗低，还能回收大量的生物能，是最佳的处理方式。

难于生物降解的或对生物有害的废水主要来自化学工业、石油化工和炼焦工业等。这类有机废水如果单独采用好氧生物法往往达不到满意的处理效果，而预先采用厌氧生物法则可以降解或提高废水的可生化性。但如果废水中含有的有机物不仅不可生化还对微生物有毒害作用，则不适用生物法，而应考虑化学方法或物化法。

含有有害物质的废水中所含有的有机物可能易于生物降解，主要来源于化学工业和发酵工业等。这类废水首先要通过适当的预处理去除废水中有毒有害物质，然后仍可继续采用厌氧生物法。

我国废水类型以工业废水为主，且排放量逐年增加，工业废水容易包含一些不可生物降解的物质或有毒物质。无论何种类型的废水，当中的有机物都是造成水污染的元凶，有机物在降解时消耗了水中的溶解氧，使水体发黑发臭。有机物在废水中以悬浮物、胶体物或溶解性有机物的方式存在，对应悬浮物(TSS)、化学需氧量(COD)和生化需氧量(BOD)等监测手段。

利用微生物代谢方式去除废水中的有机物是水污染处理中最为行之有效的手段，特别是对 BOD 含量较高的有机废水效果尤为显著。这种利用微生物生命过程中的代谢活动，将有机物分解为简单的无机物从而去除有机污染物的过程称为废水的生物处理。根据代谢过程中对氧的需求差异，微生物分为好氧微生物、厌氧微生物及介于两者之间的兼性微生物，因此废水处理工艺可分为好氧微生物处理工艺、厌氧微生物处理工艺及兼性微生物处理工艺三大类。三者比较而言，在好氧微生物处理工艺处理过程中，为了保证微生物的代

谢活性,需要向废水中不断补充大量的氧气或空气,以保证微生物在代谢过程中对水中溶解氧的需求。在好氧条件下,有机物最终被转化为水和二氧化碳等,部分有机物被微生物同化以产生新的微生物细胞,生物转盘法、好氧滤器等属于好氧处理工艺。厌氧生物处理技术无需对微生物供氧,微生物在无氧状态下把有机物转化为甲烷、氢气、二氧化碳、水等无机物和少量的细胞质,其中甲烷和氢气可作为替代传统化石燃料的高效清洁的新型能源。

通过对比发现,厌氧废水处理是一种低成本的废水处理技术,并能将废水处理与能源回收利用相结合,这使得包括中国在内的大多数发展中国家能在治理环境的同时,解决能源短缺以及经济发展和环境治理中面临资金不足等问题,是一种效率较高、操作简单、费用低廉的技术。基于这些优点,厌氧废水处理工艺能同时担任能源生产和环境保护体系的核心,为世界经济的可持续发展提供强有力的支持。

1.2 厌氧消化的基本原理

有机物厌氧消化产甲烷过程是一种由多种微生物共同作用完成的极其复杂的消化过程。1914年,Thumm 和 Reiche 通过研究发现,有机物厌氧消化过程分为酸性发酵和碱性发酵两个阶段,如图 1.1 所示。随后的 1916 年,Imhoff 也独立发现了这一过程,1930 年,Buswell 和 Neave 验证并肯定了前人的看法。

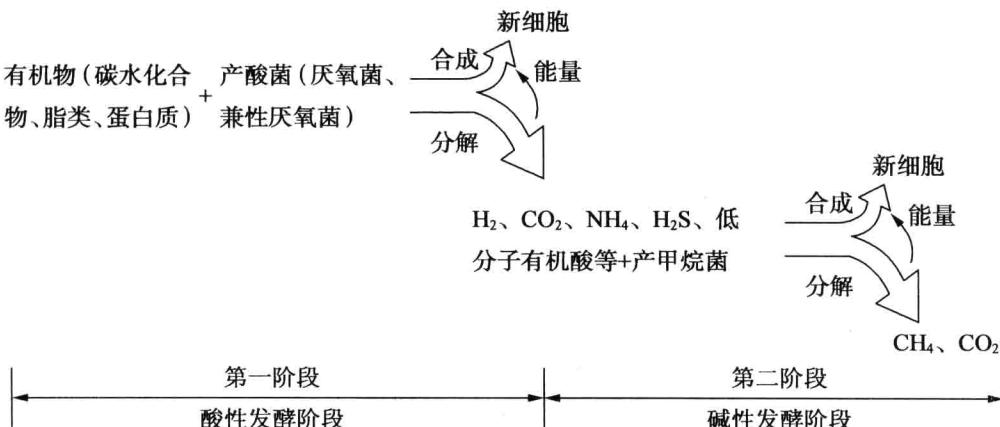


图 1.1 两阶段厌氧消化过程

从图 1.1 中可以看出,在第一阶段里,复杂的有机物,如糖类、脂类和蛋白质等,在产酸菌(厌氧菌和兼性厌氧菌)的作用下,分解为低分子中间产物,包括乙酸、丙酸、丁酸等低分子有机酸和乙醇等醇类,并伴随氢气、二氧化碳、氨离子和硫化氢等的产生。因为该阶段产生的大量脂肪酸降低了发酵液的 pH 值,发酵液呈现酸性,所以此阶段被称为酸性发酵阶段,或产酸阶段。

在第二阶段中,第一阶段的中间产物被产甲烷菌继续分解为甲烷和二氧化碳等。在有机酸不断转化为甲烷和二氧化碳的同时,系统中的氨离子使发酵液的 pH 值不断升高,发酵液呈现碱性,所以此阶段被称为碱性发酵阶段,或称产甲烷阶段。

伴随着有机物的降解,细菌利用有机物分解过程中释放的能量合成新细胞,产生新细菌,在厌氧消化的两个阶段都有新细菌的产生。但是,由于有机物厌氧消化的终产物主要

为二氧化碳和蕴含高能量的甲烷,大幅减少了有机物厌氧降解过程释放出来的能量,即可供厌氧细菌用于细胞合成的能量较少,因此厌氧菌尤其是产甲烷菌世代期较长,生长缓慢。

间歇厌氧消化反应器在消化过程中的发酵液 pH 值变化如图 1.2 所示。

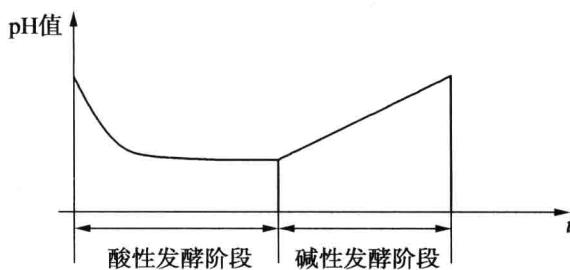


图 1.2 有机物厌氧消化 pH 值变化

厌氧消化两阶段论统治学术界长达半个世纪,国内外有关厌氧消化的专著和教科书里大多采用这一理论。直到 1979 年, M. P. Bryant 在人们对厌氧消化生物学过程和生化过程的不断深化研究的基础上,提出了厌氧消化三阶段论。该理论认为,产甲烷菌不能直接利用除乙酸、H₂、CO₂ 和甲醇等以外的有机酸和醇类,长链脂肪酸和醇类必须经过产氢产乙酸菌转化为乙酸、H₂ 和 CO₂ 等以后,才能被产甲烷菌利用。三阶段理论如图 1.3 所示。

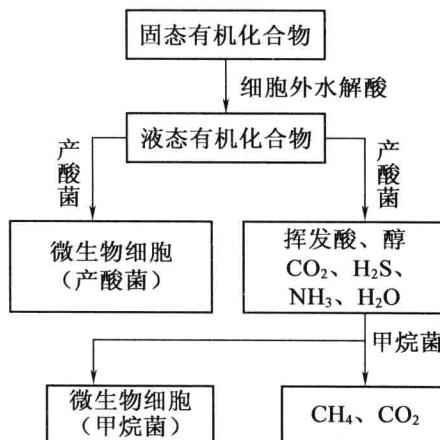


图 1.3 厌氧处理三阶段理论

第一阶段为厌氧菌和兼性厌氧菌等水解发酵菌参与的水解发酵阶段。复杂的有机物在厌氧菌胞外酶的作用下,初步分解为简单的有机物,纤维素转化为较简单的糖类,蛋白质转化为较简单的氨基酸,脂类转化为脂肪酸和甘油等。这些结构简单的有机物在产酸菌的作用下,经过厌氧发酵和氧化等过程转化为乙酸、丙酸、丁酸等脂肪酸和醇类等。水解可以定义为复杂的非溶解性聚合物被转化为简单的溶解性单体或二聚体的过程。通常情况下,水解过程极为缓慢,被认为是含高分子有机物或悬浮物废液厌氧降解的限速阶段。其影响因素很多,包括水解温度、有机质在反应器内的保留时间、有机质的组成、有机质颗粒的大小、pH 值、氨的浓度、水解产物(如挥发性脂肪酸)的浓度等。

第二阶段为产氢产乙酸阶段。该阶段中,产氢产乙酸菌把除甲酸、乙酸、甲醇以外的第一阶段中间产物转化为可被产甲烷菌直接利用的乙酸、氢和二氧化碳。

第三阶段为产甲烷阶段。产甲烷菌把第一阶段和第二阶段产生的乙酸、H₂ 和 CO₂ 等转化为甲烷。在厌氧反应器中,大约 70% 的甲烷产量由乙酸歧化菌产生。乙酸的羧基从乙酸分子中分离,甲基最终转化为甲烷,羧基转化为二氧化碳,在中性溶液中,二氧化碳以碳酸盐的形式存在。另一类产甲烷的微生物被称为嗜氢甲烷菌,它们能由氢气和二氧化碳生成甲烷。在反应器条件正常的情况下,嗜氢甲烷菌能产生占甲烷总量 30% 的产量。

像是为了支持 Bryant 一样,几乎在三阶段理论提出的同时,J. G. Zeikus 于同年在第一届国际厌氧消化会议上提出了四种群学说理论。理论认为,复杂的有机物的厌氧消化过程有四种群厌氧微生物参与,分别为水解发酵菌、产氢产乙酸菌、同型产乙酸菌(又称耗氢产乙酸菌)以及产甲烷菌。图 1.4 表达了四种群说关于复杂有机物的厌氧消化过程。

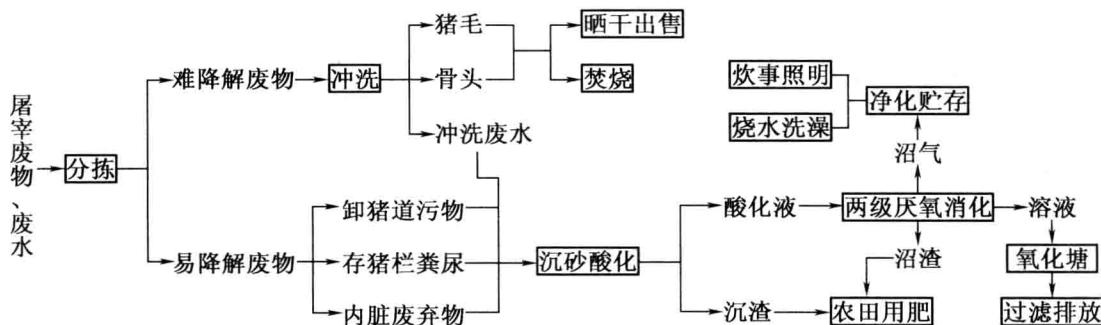


图 1.4 厌氧处理四种群学说

由图 1.4 可知,复杂有机物在第一类种群水解发酵菌作用下转化为有机酸和醇类。第二类种群产氢产乙酸菌把经第一类种群水解有机物产生的有机酸和醇类转化为乙酸、H₂、CO₂ 和一碳化合物甲醇、甲酸等。第三类种群同型产乙酸菌能够利用 H₂ 和 CO₂ 等转化为乙酸,一般情况下这类转化数量较少。第四类种群产甲烷菌把乙酸、H₂、CO₂ 和一碳化合物转化为 CH₄ 和 CO₂。

通常在有硫酸盐存在的情况下,硫酸盐还原菌也将参与厌氧消化过程,如图 1.5 所示。

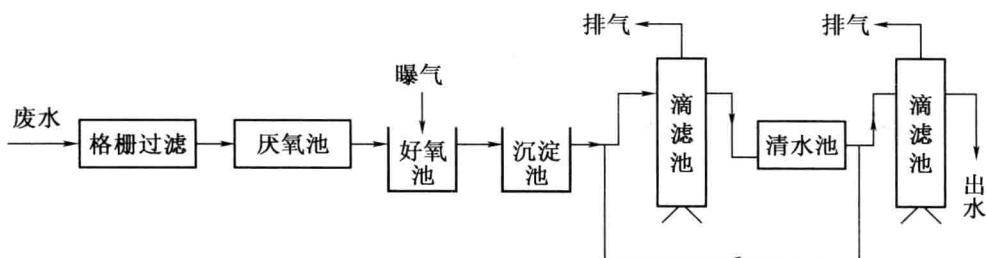


图 1.5 硫酸盐废水处理厌氧工艺

图 1.5 反映了含硫酸盐的葡萄糖水溶液在有硫酸盐还原菌参与下的厌氧消化过程。在厌氧条件下,产酸菌将葡萄糖降解为中间产物如丙酸、乙酸和乙醇等,并有少量乙酸、H₂ 和 CO₂ 产生。因 SO₄²⁻ 的存在,部分中间产物被产氢产乙酸菌转化为乙酸、H₂ 和 CO₂,另一部分则在硫酸盐还原菌的作用下转化为乙酸和 H₂S。硫酸盐还原菌还能利用乙酸或氢使 SO₄²⁻ 还原为 H₂S。

有机物厌氧消化过程是一个有多种不同微生物菌群协同作用的极为复杂的生物化学过程,从两阶段论发展到三阶段论和四种群学说是人们对这一复杂过程不断深刻认识的结果。

1.3 厌氧生物处理技术的优缺点

判断一个污染物处理方法的优劣要有切实可行的衡量尺度,见表 1.1。对于以保护水域不被污染为目标的废水处理技术,在选择确定的技术方法时,除了考虑衡量尺度外,还应有更为具体的衡量标准,见表 1.2。

表 1.1 环保技术可行性的重要衡量尺度

- A. 应能杜绝或明显减少污染物的产生
- B. 不需要用清水对污染物稀释
- C. 对环境污染的控制而言它们有较高的效率
- D. 应尽可能做到资源的回收和综合利用
- E. 应当是低成本的技术,包括基建、设备动力、操作和维修等费用应较低
- F. 操作和维修应当简单
- G. 能够在较大规模和较小规模时同样好地运行
- H. 能够被当地的人们认识和接受

表 1.2 选择废水处理方法的重要尺度

- A. 应当对各类污染物有较高的去除率,这些污染物包括:
 - 可生物降解的有机物(BOD)
 - 悬浮物
 - 氮和有机氮
 - 磷酸盐
 - 致病菌
- B. 工艺系统应当对高峰负荷、电力供应的突然中断、供液的中断以及对毒性污染物等有较高的抗干扰能力或稳定性
- C. 工艺上具有灵活性,例如,对效率的改进、规模的扩大等
- D. 工艺系统在操作、维修和控制上应当简单,应不需要工程技术人员进行连续的现场操作
- E. 占地应当少,特别在土地紧缺和地价较高的地区
- F. 工艺系统需要的不同操作单元应当尽量少
- G. 工艺系统使用寿命长
- H. 这一系列在使用中没有严重的污泥处理难题
- I. 系统不应当有严重的臭气问题
- J. 系统应当有回收有用副产品的可能性
- K. 工艺的应用有足够的经验以资借鉴

1.3.1 厌氧处理的优点

基于目前世界范围内的污染状况及其他各类环境问题的综合考虑,厌氧废水处理技术尤其不可替代的显著优势有:

(1)是一种能将环境保护、能源回收与生态良性循环结合成为综合系统的核心技术,具有较好的环境与经济收益。

(2)对中等质量浓度以上($COD > 1\,500 \text{ mg/L}$)的废水,其处理成本大大低于好氧处理成本,成本降低主要体现在动力的大量节省、营养物添加费用和污泥脱水费用的减少。

(3)厌氧处理过程能源需求少,同时还能产生大量的能源。由于厌氧菌分解有机物是营无分子氧呼吸,在分解有机物过程中是不必提供氧气的,而好氧菌降解有机物是营分子氧呼吸,分解有机物的过程必须提供分子氧,所以好氧生物处理通常需要利用空气泵进行充氧。而由于气膜液膜的阻力,好氧菌对由空气设备转移进水中的氧的利用率不是很高,这就大大提高了处理过程对能源的消耗。而厌氧处理就没有这方面的需求,因此可以大大减少能源的消耗量。有报道称,处理单位废水时,厌氧法消耗的电能不足好氧法消耗电能的 $1/10$ 。

(4)污泥消化和有机废水的厌氧发酵能产生大量的甲烷,而甲烷的热值很高,是天然气的1.1倍,可作为能源参与多种生产生活。早在20世纪二三十年代,人们就开始有计划地利用有机质生产沼气,用于炊事和供热。在现代工业中,城市废水处理厂将初沉池和二沉池的污泥消化,一方面可以稳定污泥,更重要的是可以回收污泥消化过程中产生的甲烷,用于消化池污泥加热及发电,为水泵和鼓风机提供电力。甲烷产量极其可观,有资料显示,发达国家的城市废水处理厂的污泥厌氧消化所产生的沼气转化的能量能解决处理厂所需电力的33%~100%。

(5)厌氧设备负荷高,占地少。厌氧反应器容积负荷远远好于好氧法,单位反应器容积的有机物去除率很高,特别是后期研制的新型高速厌氧反应器单位容积负荷及有机物去除率更高,使其体积更小,占地面积更少,这一优点对于人口密集、地价昂贵的地区尤为重要。

(6)产生的剩余污泥量大大少于好氧处理法,且剩余污泥脱水性能好,浓缩时可不使用脱水剂,并且,由于厌氧微生物增殖缓慢,处理厌氧方法的剩余污泥易于好氧方法。厌氧法剩余污泥的高度无机化可用作农田肥料或作为新运行的废水处理厂的种泥。

(7)对营养物的需求量小。按照可生物降解的COD为计算依据,好氧方法的氮磷需求为 $COD:N:P = 100:5:1$,而厌氧方法为 $(350 \sim 500):5:1$ 。有机废水一般已含有一定量的氮和磷及其他多种微量元素,因此厌氧方法可以少添加甚至不添加营养盐。

(8)对某些难降解有机物有较好的降解能力。随着化学工业的发展,越来越多的非自然界有机物被合成,这些人工合成的有机物大多产自制药、石油化工、有机溶剂和燃料制造等工业,其中有些可以生物降解,有些则难于生物降解或不能生物降解,甚至是毒物质。这些毒物质一旦进入食物链会导致致癌、致畸、致突变等严重危害,而常规的好氧废水生

物处理系统,不但不能理想地处理这些有机物,有机物还可能对微生物产生毒害,影响生物处理的正常进行。实践证明,虽然一些难降解的有机工业废水采用常规的好氧生物处理工艺不能获得良好的处理效果,但是厌氧生物法则可获得较好的处理效果,厌氧微生物具有某些脱毒和降解有害有机物的功效,还具有某些好氧微生物不具有的处理多氯链烃和芳烃等有机物的功能。应用厌氧处理工艺作为有机废水的前处理,可使一些好氧处理难以降解的有机物得到部分降解,并使大分子降解为小分子,提高了废水的可生化性,将后续的好氧处理变得比较容易,所以工艺上常常将厌氧处理与好氧处理串联起来处理难以降解的有机废水。

(9) 可处理高浓度有机废水,无需大量稀释水。

(10) 厌氧菌种可以在中止供给废水与营养的情况下,较长时间保留其生物活性与良好的沉淀性能,保留时间在一年以上,这为间断的或季节性的运行提供了有利条件,因此厌氧颗粒污泥可作为新建厌氧处理厂的种泥出售。

(11) 厌氧系统规模灵活,设备简单,易于制作,成本低廉。

1.3.2 厌氧处理的不足

厌氧生物处理技术固然有其不可替代的优越性,其种种优点尤其适合我国当前资金短缺、能源不足与污染严重的环境现状,是一种值得推广的技术。但因其技术起步较晚,理论及实践都存在一定的局限性,尚有不足之处:

(1) 厌氧方法虽然负荷高,去除有机物的绝对量与进水浓度很高,但其出水 COD 浓度高于好氧处理技术,需要后续处理才能达到排放标准。

(2) 厌氧处理法不能去除废水中的氮和磷。由于厌氧消化微生物的细胞合成对氮和磷的需求量较低,所以废水中含氮和磷的有机物大部分通过厌氧消化转化为氨氮和磷酸盐随出水排出,而氮和磷是营养物质,也是造成河流湖泊等水体富营养化的主要原因,虽然厌氧法在去除 COD 和 BOD 方面具有高效低耗的优点,但是因其不能去除废水中的氮和磷,使其应用存在局限性。为了弥补厌氧生物处理不能去除废水中的氮和磷的缺点,含氮和磷丰富的有机废水需以好氧工艺结合处理。

(3) 厌氧微生物对有毒物质较为敏感,如果对有毒废水性质了解不足或发生严重的操作事故,可能导致反映其运行条件的恶化。但是随着人们对有毒物质认识程度的加深及工艺上的改进,这一问题正在得到逐步解决,人们发现厌氧细菌经过驯化后可以极大地提高其对毒性物质的耐受力。

(4) 因为厌氧细菌增殖较慢,所以反应器初次启动过程缓慢,但也因此厌氧处理的剩余污泥产量较少。目前人们运用现有厌氧系统的剩余污泥作为初次启动系统的种泥接种,可缩短系统的启动时间。

(5) 因为一般废水中均含有硫酸盐,厌氧条件下会产生硫酸盐还原作用放出硫化氢等有毒且具有恶臭的气体,如果反应器不能做到完全密闭就会散发出臭气,引起二次污染。

因此厌氧处理系统的各处理构筑物应尽可能密封,防止臭气散发。

(6)运行管理较为复杂。由于厌氧菌的种群较多,例如,产酸菌与产甲烷菌的性质各不相同,其关系又较为密切,要保持这两大类种群的平衡就对运行管理提出更为严格的要求,稍有不慎就可能造成两大种群的失衡,影响反应器的正常工作。例如,进水负荷的突然提高,反应器 pH 值的下降等,如果不及时控制,就会出现反应器酸化现象,从而严重抑制了甲烷的生成,甚至造成反应器崩溃,必须重新启动。近年来有人提出将产酸与产甲烷阶段分开,采用两相结合方式进行废水厌氧处理,既可以有效解决种群平衡敏感的问题,又利于微生物种群更好地处理废水。

1.4 厌氧生物处理工艺的发展概况

1.4.1 厌氧生物处理工艺的发展进程

早在几千年前,人类就有以粪便为农家肥施于农田的做法,这便是早期的厌氧生物处理,其做法是将动植物残体、人畜粪尿或两者的拌和物进行长期厌氧发酵,使其中的有机物无机化或稳定化,有机氮转化为无机氮,并保持磷、钾等及微量元素,为农作物提供肥分,一般发酵时长在半年至一年之间。随着工业化发展,城镇人口不断增加,粪便、工业废水等不断排入河流中引起水体变质,应用价值下降,19世纪50年代,西方国家开始重视水污染问题,并着手探索生物处理方法解决这一问题。

废水厌氧生物处理技术发展至今,已有120多年的历史了,发展概况见表1.3,最早由法国人 Louis Mouras 把简易沉淀池改进作为污水污泥处理构筑物使用。从1860~1897年,厌氧消化工艺经历了它的第一个发展阶段,即简单的沉淀与厌氧发酵合池并行的初期发展阶段。此阶段的发展特点为:

- ①在腐化池(我国习惯称之为化粪池)中集中进行污水沉淀和污泥发酵,以简易的沉淀池为基础,适当扩大其污泥贮存容积,作为挥发性悬浮固体液化的场所。
- ②处理对象为污水污泥。当时仅以悬浮固体作为污染指标,因而处理效果通常以悬浮固体的液化(水解)作为衡量标准,这其中不可避免地进行着酸化和气化过程。
- ③腐化池设计精确,至今仍应用于无排水管网地区以及某些大型居住或公用建筑的排水管网上。

随后,在1899~1906年间,厌氧消化工艺经历了它的第二个发展阶段:污水沉淀与污泥发酵分层进行。其特点有:

- ①用横向隔板把污水沉淀和污泥发酵分隔在上下两室各自进行,上层为污水沉淀室,下层为污泥发酵室,即形成了所谓的双层沉淀池。
 - ②仍以悬浮固体作为污染指标,但已认识到生物气的能源效益,并开始开发利用。
 - ③20世纪60年代后,双层沉淀池逐渐退出应用舞台。
- 厌氧消化工艺的第三个发展阶段始于1912年,即独立式营建的高级发展阶段。此阶段

开发的主要处理设备有普通厌氧消化池和生流式厌氧污泥床反应器,同时发展了厌氧接触工艺、两相厌氧消化工艺、厌氧生物滤池及厌氧流化床等。此阶段发展特点有:

①将厌氧发酵室从沉淀池中分离出来,建立独立工作的厌氧消化反应器,发展出功能齐全、构型各异的厌氧消化装置,由处理污水污泥发展到处理高浓度有机废水,由处理营养性有机物发展到处理抑制性有机物等。

②将有机废水及污泥的处理和生物气的利用结合起来,既能达到环境保护的目的,又能开发利用新型能源。

③处理对象除可挥发悬浮固体外,还着眼于化学需氧量和生物需氧量的降低,以及某些有毒有机物的降解。

20世纪80年代以来,在原有的废水处理新工艺基础上陆续开发出如UBF、USR、EGSB、IC等新的高效厌氧处理工艺。这些新颖厌氧处理工艺的开发,打破了过去认为厌氧处理工艺处理效能低、需要较高温度、较高废水浓度和较长停留时间等传统观念,逐步适应各种不同温度和不同浓度的有机废水。

表 1.3 厌氧生物处理工艺发展概况

分类	年代	名称	人物地点	特 点
混合式	1860 ~ 1881	Moures 净化器	法国 M. L. Moures	改进后的沉淀池使沉淀污泥能厌氧液化, 处理对象为挥发性悬浮固体
	1890	厌氧填料 床过滤器	英国 M. D. Scott-Henerielf	
	1894	腐化池	英国 Donald Cameron	连续进出水,浮渣影响出水水质,并形成 结渣层,有臭气散发,污泥每年清掏1~2次
	1897	集气式 腐化池	印度孟买马通戈 麻风病院	腐化池顶安装了集气器,首次回收了生物 能源,收集气体用于驱动发动机
分隔式	1899	分隔式 腐化池	美国 W. Clark Harry	提出分隔污水沉淀与污泥发酵的构想
	1903	Travis 双层沉淀池	英国 Travis	分隔沉淀池,上层为污水沉淀室,下层为污泥 发酵室;下室每十多天排空老化污泥一次,用 1/5 污水注入下室冲走危害发酵的物质
	1906 ~ 1940	Imhoff 双层沉淀池	德国 Karl Imhoff	下室很大,污泥能完全消化,污泥龄不小 于 60 d,能去除 95% 的污染物