



华夏英才基金学术文库

厌氧生物技术 (I)

——理论与应用

◎ 王凯军 编著

ANAEROBIC BIOTECHNOLOGY (I):
THEORY AND APPLICATION



化学工业出版社

华夏英才基金学术文库

厌氧生物技术 (I) ——理论与应用

王凯军 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍厌氧生物技术的理论与应用,和《厌氧生物技术(Ⅱ)——工程与实践》构成一个完整的、有机的体系。

本书回顾了世界范围内厌氧技术三十多年的发展史,重点介绍了厌氧生化反应和厌氧微生物的理论、反应器流态理论、反应器理论和厌氧反应动力学等基础理论问题,丰富充实了当前厌氧领域对颗粒污泥现象、厌氧高效反应器的发展、厌氧分相分级反应器以及碳、氮、硫的(厌氧)生物循环与应用的认识。

本书涉及厌氧生物技术的多个研究领域,介绍了诸多新技术,对工业行业废水污染控制提出了解决方案,可作为有关企业、环境工程设计单位的科研人员及相关工作者的参考资料,也可作为大专院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

厌氧生物技术(Ⅰ)——理论与应用/王凯军编著.

—北京:化学工业出版社,2014.10

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-122-12538-5

I. 厌… II. 王… III. 厌氧处理-生物技术

IV. ①X703.1②X705

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第209099号

责任编辑:郎红旗 李姿娇

装帧设计:韩 飞

责任校对:蒋 宇

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:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张23 彩插2 字数569千字 2015年1月北京第1版第1次印刷

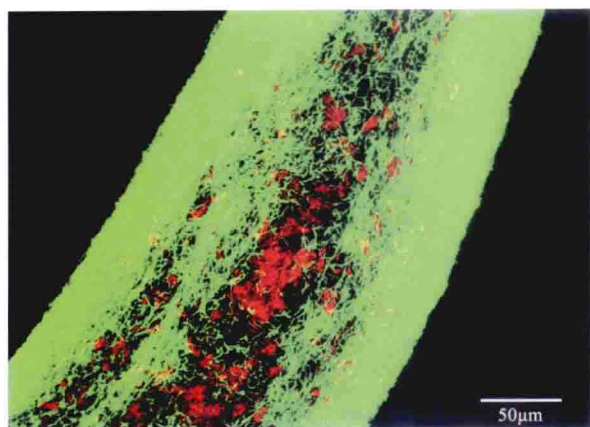
购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

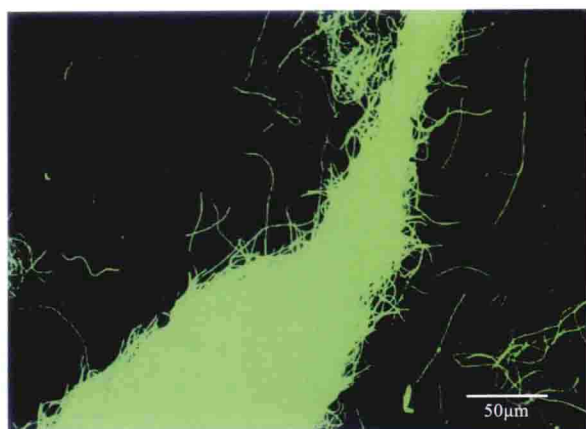
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00元

版权所有 违者必究

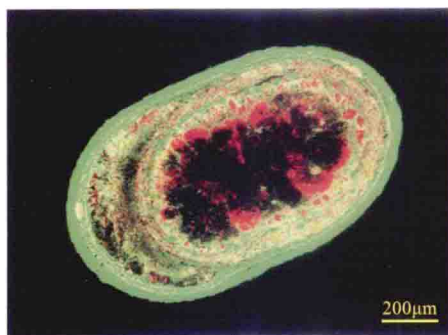


(a)

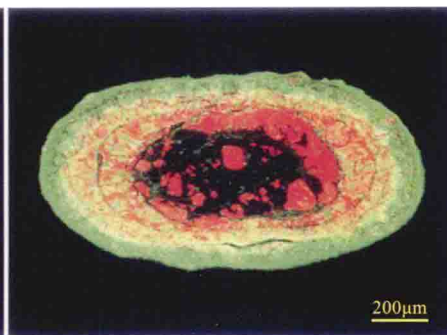


(b)

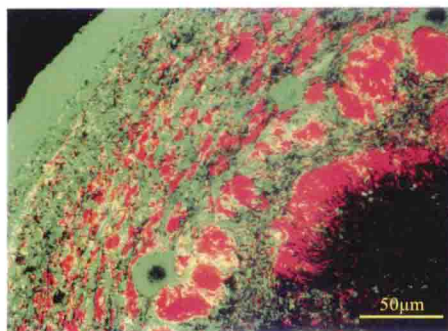
图5-11 采用共焦距激光扫描电镜、ARC915探针(为红色)和专门为非硫绿色细菌设计的GNSB633探针(为绿色)在膨胀的高温颗粒污泥的表层发现长丝状菌[图(a)和放大图(b)] (见正文156页)



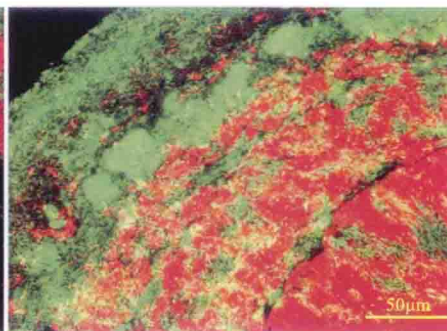
(a) 低倍镜观察结果



(c) 低倍镜观察结果



(b) 高倍镜观察结果



(d) 高倍镜观察结果

图6-16 采用FISH技术和CLSM获得的中温[(a)和(b)]和高温[(c)和(d)]颗粒污泥结构组成的照片 (见正文190页)
与EUB338探针反应的为细菌(绿色); 与ARC915探针反应的为古菌(红色)

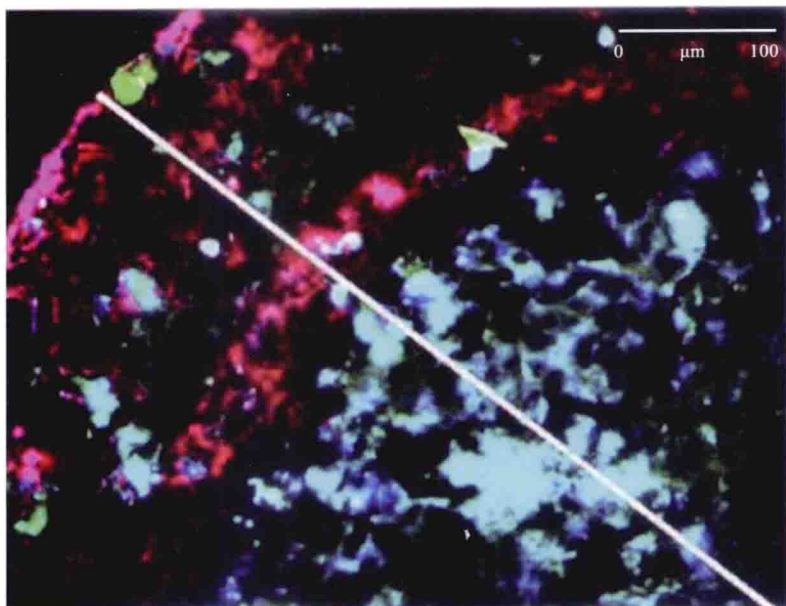


图6-17 采用FISH技术观察颗粒污泥，内部主要是甲烷微生物(绿色)，外层主要是鬃毛甲烷菌(红色) (见正文191页)

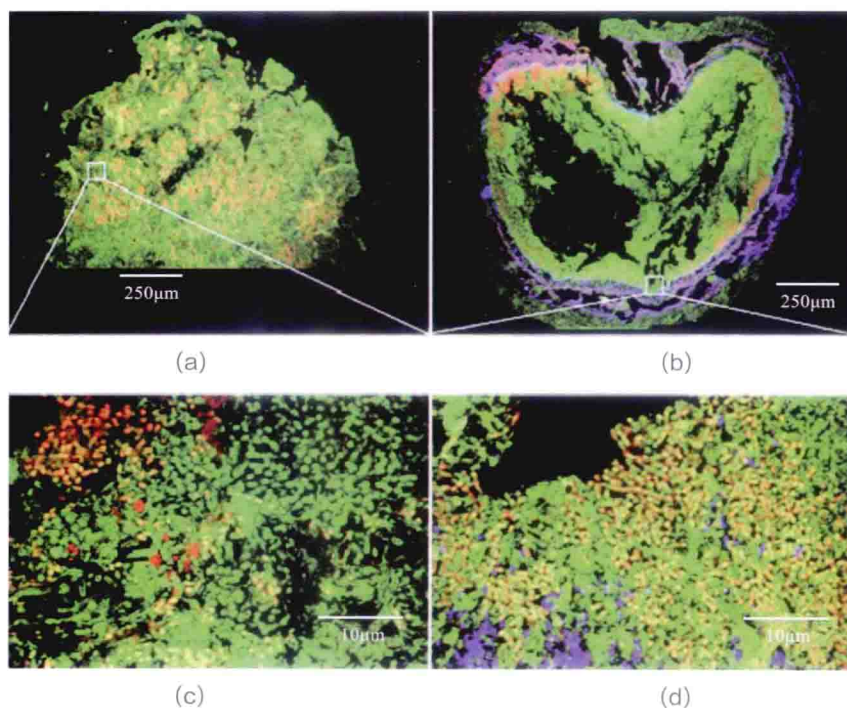


图6-28 采用针对甲烷丝菌的MS5和甲烷八叠球菌的MB4原位杂交探针与低分辨率($10^3\times$ 物镜)共聚焦激光扫描显微镜(CSLM)所获得的光学超薄切片(xy平面)照片 (见正文210页)

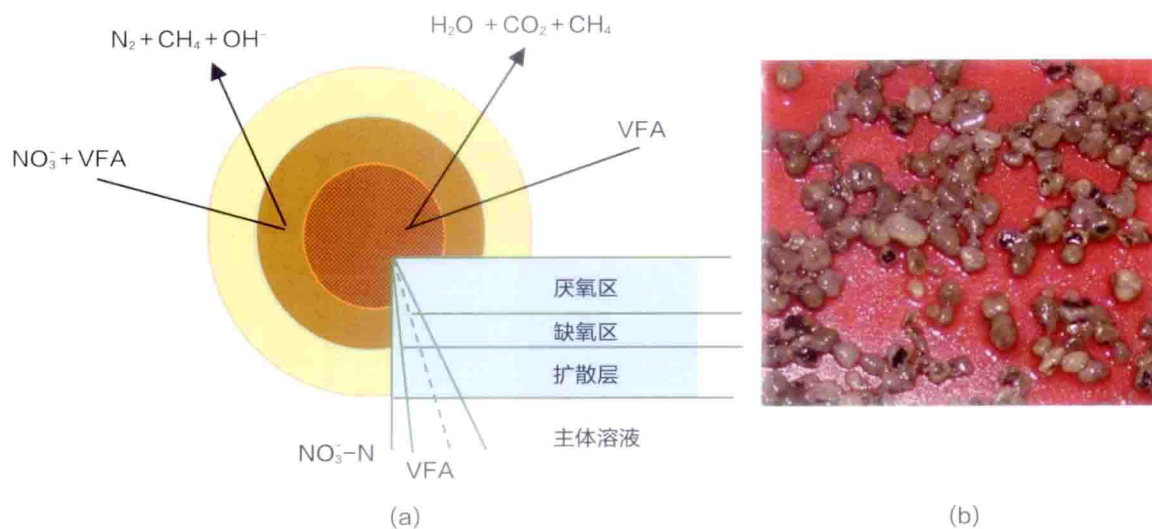


图6-35 同时反硝化(或厌氧氨氧化)/产甲烷过程颗粒污泥结构假想(a)和实验获得的颗粒污泥(b) (见正文217页)



图9-10 杜兵成功运行ANAMMOX的实验室反应器 (见正文308页)

前 言

谈到现代厌氧技术的发展，不能不谈到 20 世纪 80 年代初迅速发展的升流式厌氧污泥床（UASB）反应器技术，而 UASB 技术的发展与 Lettinga 教授的贡献是密不可分的。Lettinga 教授是 UASB 的发明者，对世界厌氧技术的发展做出了卓著的贡献，为此曾获得素有“环境科学诺贝尔奖”之称的美国“泰勒环境奖”（John and Alice Tyler Ecology Award），并于 2009 年 6 月获得了第二届新加坡李光耀水奖。Lettinga 教授对 UASB 技术，乃至近年来风行的颗粒污泥膨胀床（EGSB）技术的最重要的贡献之一，是他并未将这一技术仅作为个人专利保护起来，而是将其彻底公开——他声明 UASB 反应器概念对所有人都是公开的，特别是对发展中国家的人民。他曾经多次和笔者讲不要将技术的发明申请专利，那是没有任何意义的。

但之后在多次访问中国和亚洲其他国家期间，每当与会者问起三相分离器的设计等 UASB 的关键技术时，他却从未进行深入解答，很多人对此不理解，误以为 Lettinga 教授对技术保密。事实上，在 20 世纪 80 年代中期他就曾经对中国厌氧界的同行表示，UASB 的三相分离器是一个实际应用的问题，如果想深入了解 UASB 技术，今后有机会中国可以派遣人到荷兰进行实地学习。笔者有幸于 1991 年前往荷兰 Wageningen 农业大学攻读博士学位，成为 Lettinga 教授的第一个也是唯一的来自中国大陆的博士生，这个机会对我来说弥足珍贵。Lettinga 教授也一直没有忘记对中国厌氧界的承诺，笔者在荷兰学习期间，他曾多次亲自驱车带我一同前往参加他对企业的咨询，让我现场了解 UASB 和 EGSB 技术。虽然，笔者的硕士研究受教于我国 UASB 技术的开拓者之一郑元景先生，而在攻读博士学位期间就教于 Lettinga 教授的门下，但是，在两位厌氧技术的名师门下我均没有直接从事厌氧高浓度有机废水处理技术的研究，我的研究方向一直侧重于城市污水处理。我真正了解 UASB 和 EGSB 技术正是得益于在荷兰这些参观和访问潜移默化的影响。

我国从 20 世纪 80 年代初开发和引进 UASB 处理技术后，在国家“七五”和“八五”期间经过十余年连续攻关，但仍然不能很好地将第二代厌氧反应器推广到生产实践中。在此期间国际上厌氧处理技术迅速发展，已经向第三代厌氧反应器大范围的应用转变。在荷兰的这一段经历使我有机会在 90 年代中期和左剑恶教授与山东十方环保公司组成研究团队，一起承担了国家的 UASB 反应器产业化“九五”攻关研究。与以往的研究不同，我们首先确定了中国高效厌氧反应器发展的路线图，具体的战略思路是：第一步，从 UASB 反应器及其配套设备的设备化、标准化和产业化入手，首先解决工程应用上量的差距问题，目的是使 UASB 的设计标准化、规范化和简单化，使得大量运转和设计人员将精力放在反应器的运行关键技术问题上，而不是设备等其他的枝节问题。从厌氧技术发展上讲，无法在大规模的生产装置上形成稳定的颗粒污泥，就无法谈到高效厌氧反应器的应用，因此，第二步是建立全国范围的颗粒污泥生产基地。“九五”期间我们对 UASB 技术进行了多领域、大范围的推广，厌氧技术在中国的迅速推广得益于这一基础工作。笔者在项目结束时秉承 Lettinga 教授的教导，说服研究团队特别是企业将 UASB 的成果在《UASB 工艺的理论工程实践》一书中全部公布，期冀也能为我国厌氧技术的发展略尽绵薄之力。最后是在厌氧技术上全面

赶超国际先进技术的阶段。“十五”期间，我和左剑恶教授组成的厌氧研究团队在第三代厌氧技术上全面赶超国际先进技术。在这一时期，我们从理论上提出了颗粒污泥悬浮床反应器的概念，丰富了反应器的理论体系；形成了相对完备的技术体系，进行了多领域、大范围的推广。到目前为止，我们团队建立了 400 多个 UASB 和 EGSB 反应器的工程项目，厌氧技术在中国赶超世界先进水平得益于这一工作。2009 年，在邀请 Lettinga 教授访问期间我们汇报了这一工作，他认为我们的团队和十方公司在厌氧领域的工作，是目前世界上最大的和成功的厌氧技术的推广。我想，世界大师的肯定是对我们团队工作研究最好的评价。

结束“九五”和“十五”研究之后，便萌生了对过去十年研究进行全面总结，从而结束这一领域的研究，下一步转移到新的研究领域的想法。本书的出版几经周折，初稿脱稿于 2003 年全国暴发 SARS 后，笔者到加拿大多伦多约克大学的工商管理学院进修期间，但之后由于各种原因本书在当时没有及时出版。这次重新提交到出版社之前，笔者曾担心这些资料和历史对读者是否已经陈旧，是否已失去很好的借鉴作用，是本书的第一批读者——包括我的合作者们和学生——一致鼓励我出版本书，认为本书仍然有很强的现实指导意义。事实上，现在我的一些硕士生和博士生仍然以本书的手稿作为重要参考资料以及一些工程应用的指导。感谢他们的鼓励，为飨读者，近半年来我重新审视和更新了本书的全部内容。

在应用层面，首先，厌氧工艺作为环境保护和资源回收的核心技术的基本思路，对当前我国提倡走可持续发展的道路，通过节能减排实现低碳排放具有十分重大的意义；其次，通过回顾在 20 世纪 70 年代末到 80 年代初厌氧技术的发展历程，分析其为什么是在欧洲（特别是在荷兰）而不是在最先开始研究厌氧技术的美国获得成功的原因，认真思索，会使人们对政府、公司和学术界（也就是现在人们经常提到的官、产、学、研、用体制）在促进新技术应用中的作用有新的认识。从学术上考虑，厌氧颗粒污泥现象的发现和发现，促使 UASB 和 EGSB 反应器在全世界范围的广泛应用；对于硫的生物循环过程新的发现，促使硫酸盐废水厌氧处理、生物脱硫和重金属去除等一系列工艺的开发；氮素循环的微生物新途径，产生厌氧氨氧化工艺。水处理领域的这一系列重大发现和发明，为什么在二十年间集中涌现在荷兰 Wageningen 和 Delft 两所大学，是学术界应该认真深思的一个现象。是否像 Lettinga 教授诠释的那样，这一成果完全得益于工程人员与微生物学家长期有效的合作？从商业运作上考虑，为什么众多从事 UASB 的公司在一个时期停步于 UASB 的发展而与 EGSB 的发现失之交臂，而独有 Paques 公司在第三代厌氧反应器开发上一枝独秀？非常有意思的问题是，McCarty 教授在第一次国际厌氧会议上作了题为《厌氧发酵一百年》的主题报告，时隔近三十年后在墨西哥的第十二届国际厌氧会议上作了重新返回厌氧研究领域后关于生活污水厌氧处理的报告，我向同行提出一直萦绕心头的问题——为什么荷兰的 Lettinga 教授、美国的 McCartney 教授和 Jewell 教授、比利时的 Verstraete 教授以及英国的 Stuckey 教授，这些世界上顶级的厌氧大师们均对生活污水处理技术研究情有独钟？

我相信重新审视这一系列重要问题，对于今天仍然有十分重要的意义。本书将通过问题的讨论和对研究内容的阐述，回顾国际上厌氧技术三十多年的发展史，总结笔者到目前为止在厌氧领域二十多年的工作。

需要说明的是，笔者在写作时将《厌氧生物技术》一书分为“理论与应用”和“工程与实践”两部分。其中，“理论与应用”部分重点介绍了厌氧生化反应和厌氧微生物的理论、反应器流态理论、反应器理论和厌氧反应动力学等基础理论问题，以期有针对性地加深对颗粒污泥现象、厌氧高效反应器的发展、厌氧分相分级反应器以及碳、氮、硫的（厌氧）生物

循环与应用的认识；“工程与实践”部分对厌氧技术在工业、城市污水和固体废物处理等各个行业的应用进行了概括和总结，从中高浓度废水、低温和低浓度废水、难降解废水、复杂废水和高含硫废水几个方面对三代厌氧反应器的发展和应用进行了详细介绍，通过各个章节逐步介绍各种新技术、新工艺、新设备和新材料，并对厌氧反应器设计的一般要求进行了总结。在各个章节中介绍的内容具有应用的普遍性，而不是仅仅局限于单一技术和某种废水。最后，笔者试图将国内外和本人近年来在农业废弃物、能源作物、生物质垃圾等领域的新的探索呈现给读者。当然，很遗憾地发现这些重要的进展显然是本书承载不下的，所以只能概括性地总结厌氧技术在这些领域新的发展。

本书涉及有关厌氧生物技术的多个研究领域，介绍了诸多新技术，同时也对工业行业废水污染控制提出了解决方案，可作为有关企业、环境工程设计单位、大专院校的师生和科研人员的参考资料。但是，本书介绍的内容仅仅是笔者收集到的一些国内外同行的工程实践和笔者个人在环境污染控制领域中的一些探索，很多内容还不成熟，国内同行在参考过程中还需结合实际情况进行分析。

厌氧生物技术涉及诸多学科、行业、领域，本书的编写得益于这些学科、行业的国内外专家学者卓有成效的工作，在此谨向我所直接或间接引用过的相关作者的工作表示衷心的感谢。最后，笔者衷心感谢左剑恶、甘海南、贾立敏、贺延龄等众多合作者，正是和他们多年来卓有成效的合作，才促成了本书的成果；感谢我的学生阎中、江翰、胡超、方浩、郑明霞等对本书做出直接和间接的贡献。在本书的编写过程中，还得到了张桂华、常立春、林秀军等同志的帮助，在此一并表示感谢。

由于本书涉及内容庞杂，而笔者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请批评指正。

编著者
2014年5月

目 录

第 1 章 可持续发展的废水生物处理核心技术	1
1.1 厌氧生物技术的应用领域	1
1.1.1 厌氧处理在世界范围的成功	1
1.1.2 厌氧处理的现实和潜在应用领域	2
1.2 厌氧处理技术在全世界范围的应用	14
1.2.1 不同厌氧技术的应用情况	14
1.2.2 厌氧颗粒污泥床反应器	14
1.2.3 厌氧处理技术的应用领域	15
1.2.4 厌氧处理技术的产业化	15
1.3 厌氧处理技术在我国的应用	16
1.3.1 在我国的应用统计	16
1.3.2 我国厌氧技术发展现状及展望	18
1.4 污水处理中的可持续发展问题	19
1.4.1 国内外污水处理技术的发展	19
1.4.2 我国城市污水处理总体发展及技术路线的思考	19
1.4.3 厌氧工艺成为可持续发展的核心技术	20
参考文献	21
第 2 章 厌氧微生物和生化反应基础	24
2.1 厌氧发酵反应基础	24
2.1.1 有机物的生物代谢	24
2.1.2 有机物的厌氧消化过程	32
2.1.3 非产甲烷菌的重要作用	37
2.2 产甲烷菌的分类、生理和生化特性	37
2.2.1 早期研究	37
2.2.2 产甲烷菌的分类	38
2.2.3 产甲烷菌的鉴别特性	39
2.3 产甲烷菌的营养物和抑制物	43
2.3.1 生长营养因子	43
2.3.2 生长抑制因子	43
2.3.3 产甲烷菌中的矿物质组成	44
2.3.4 微量营养元素的功能和作用	45
2.4 硫酸盐还原菌和硫酸盐还原反应	46
2.4.1 硫酸盐还原菌的研究进展	46
2.4.2 含 SO_4^{2-} 条件下有机物的厌氧消化过程	47
2.4.3 硫酸盐还原菌的微生物学研究	47

2.4.4	影响硫酸盐还原菌生长的主要因素	49
2.4.5	硫酸盐还原菌的典型生化代谢反应	50
2.4.6	硫酸盐还原菌和产甲烷菌等细菌之间的基质竞争	50
	参考文献	53
第3章	厌氧消化的物化反应过程基础	55
3.1	酸碱平衡和 pH 控制	55
3.1.1	缓冲体系及其碱度	55
3.1.2	pH 控制策略	57
3.1.3	厌氧反应体系中的酸碱平衡	59
3.1.4	废水特性对 pH 值的影响	62
3.2	温度对厌氧发酵的影响	62
3.2.1	厌氧反应温度的初步研究	62
3.2.2	厌氧菌的温度类型	63
3.2.3	温度对废水物理化学特性的影响	65
3.2.4	温度对生物反应特性的影响	67
3.2.5	温度影响的基本数学模型	69
3.2.6	厌氧处理工艺	70
3.3	厌氧反应器的水力学问题	72
3.3.1	水力学模型的对象和方法	72
3.3.2	理想反应器的停留时间分布	74
3.3.3	理想模型扩展	75
3.3.4	非理想反应器的流动模型	79
3.4	厌氧反应器的水力学模型应用	81
3.4.1	厌氧滤池水力学模型	81
3.4.2	UASB 反应器组合流态模型	82
3.4.3	UASB 反应器轴向混合模型	83
3.4.4	厌氧悬浮污泥床反应器流态	85
3.4.5	生产性厌氧悬浮污泥床反应器流态	88
	参考文献	93
第4章	厌氧反应系统分析方法和应用	95
4.1	动力学基本方程	95
4.1.1	厌氧生物反应动力学	95
4.1.2	基质抑制方程	98
4.2	反应动力学方程的应用	101
4.2.1	有回流系统的厌氧反应器	101
4.2.2	无回流系统的厌氧反应器	103
4.2.3	生物膜反应器	103
4.3	厌氧复杂系统的结构模型方法	104
4.3.1	系统结构模型初步研究	104
4.3.2	结构模型 (ADM1 模型)	106

4.4 厌氧复杂系统的系统分析方法	115
4.4.1 模糊神经网络模型	115
4.4.2 系统动力学模型	119
4.4.3 系统动力学模型的验证	125
4.5 系统稳定性分析理论	126
4.5.1 运动稳定性问题	127
4.5.2 稳定性数学理论的应用	129
4.5.3 运动稳定性问题的定性分析——相平面分析法	132
4.5.4 反应器的动态问题研究	133
参考文献	135
第5章 UASB 反应器的启动和颗粒污泥现象	138
5.1 厌氧反应器的启动	138
5.1.1 厌氧反应器的接种物	138
5.1.2 厌氧反应器的启动初步研究	139
5.1.3 其他接种污泥	141
5.2 UASB 反应器中颗粒污泥的培养	141
5.2.1 UASB 反应器中污泥的颗粒化及颗粒污泥的类型	141
5.2.2 污泥流失和污泥停留时间及其对污泥龄的影响	145
5.2.3 污泥颗粒类型与接种物和启动条件的关系	148
5.3 运行条件对 UASB 反应器和污泥颗粒化的影响	150
5.3.1 营养元素和环境条件	150
5.3.2 基质的影响	152
5.3.3 污泥负荷对颗粒污泥形成的影响	156
5.4 UASB 反应器的快速启动措施	158
5.4.1 添加载体的作用	158
5.4.2 投加颗粒污泥	159
5.4.3 投加惰性载体	161
5.5 颗粒污泥形成的控制要素	164
5.5.1 最短的启动时间	164
5.5.2 利用载体和颗粒污泥的重要性	165
5.5.3 保持污泥量的措施	165
5.5.4 接种物、基质和启动策略等综合因素的作用	165
5.6 一次启动和二次启动中的技术问题	166
5.6.1 一次启动总结	166
5.6.2 二次启动	167
5.6.3 二次启动过程常见问题及其解决方案	169
参考文献	170
第6章 厌氧颗粒污泥的产生机理	173
6.1 厌氧颗粒污泥的发现历史	173
6.1.1 高效厌氧反应器和颗粒污泥	173

6.1.2	颗粒污泥的定义	174
6.1.3	污泥颗粒化的意义	176
6.2	厌氧污泥颗粒的组成和性质	178
6.2.1	颗粒污泥的形态	178
6.2.2	颗粒污泥的化学组成	179
6.2.3	颗粒污泥的物理性质	180
6.2.4	颗粒污泥中的微生物	183
6.3	颗粒污泥的研究方法和结果	185
6.3.1	生产装置中颗粒污泥的性质	185
6.3.2	颗粒污泥的微生物组成分析	187
6.3.3	颗粒污泥生物活性的表征和测定	192
6.4	颗粒污泥的形成机理	193
6.4.1	颗粒污泥机理研究的背景	193
6.4.2	颗粒污泥形成观察中的基本现象	195
6.4.3	颗粒污泥的开普敦假说	197
6.4.4	生物膜理论的解释	200
6.4.5	颗粒污泥形成机理的宏观解释	204
6.5	颗粒污泥结构形成的综合性理论	209
6.5.1	以甲烷丝菌为核心的多层颗粒污泥结构	209
6.5.2	颗粒污泥分层结构实验观察	212
6.5.3	颗粒污泥的宏观结构理论和应用	213
6.6	颗粒污泥的增殖和消亡	217
6.6.1	负荷对颗粒污泥的影响	217
6.6.2	颗粒污泥的衰亡	220
	参考文献	224
第7章	厌氧反应器分相和分级系统	229
7.1	生物处理工艺中的分级作用	229
7.1.1	好氧生物污水处理中的分级工艺	229
7.1.2	分相/分级反应器对厌氧污水(污泥)处理工艺的改善	229
7.1.3	厌氧反应器的分相	230
7.1.4	厌氧反应器的分级	231
7.1.5	反应器的分相和分级的异同	232
7.2	可能影响工艺运行的构造形式	232
7.2.1	反应器可能的组合形式对分相/分级的影响	232
7.2.2	采用 CSTR 反应器的定性研究	233
7.2.3	工程上各种类型的分相/分级反应器	235
7.2.4	分级和不分级的厌氧滤池的对比实验研究	236
7.3	厌氧发酵的气相管理	237
7.3.1	气体吹脱去除硫化氢	237
7.3.2	厌氧处理的气体管理实例	238

7.4 厌氧分级反应器处理“复杂”废水	239
7.4.1 “复杂”废水的类型	239
7.4.2 新型厌氧分级反应器的发展	241
7.4.3 分级处理易降解和难降解基质——PTA 废水	243
7.5 通过电子受体分级-厌氧-好氧串联处理	244
7.5.1 多级串联处理工艺的扩展	244
7.5.2 采用厌氧-好氧序批工艺处理偶氮染料	245
7.6 分级处理工艺在高、低温废水处理中的应用	246
7.6.1 分级 EGSB 反应器处理低温废水	246
7.6.2 分级厌氧生物反应器应用高温条件处理废水	249
7.7 两级厌氧工艺处理复杂废水	250
7.7.1 UASR 反应器处理高悬浮物含量污水	250
7.7.2 两级工艺处理屠宰废水的研究	251
7.7.3 处理高悬浮物生活污水的污泥稳定化问题	251
参考文献	254
第 8 章 第三代新型高效生物反应器的理论	257
8.1 新型高效生物反应器的形成和发展	257
8.1.1 新型高效生物反应器的类型	257
8.1.2 第三代高效生物反应器简介	259
8.2 新型高效生物反应器的基本理论	261
8.2.1 基本概念分析	261
8.2.2 SP 反应器的基本参数	265
8.2.3 生物膜对载体流化的影响	267
8.3 载体颗粒的生物膜	271
8.3.1 细胞固定化的过程	271
8.3.2 生物颗粒的形态和结构	272
8.3.3 生物膜的特性与生物量	276
8.3.4 生物膜生长的影响	277
8.4 气提反应器	278
8.4.1 气提反应器的基本结构	278
8.4.2 气提反应器的基本参数	279
8.4.3 气提反应器的特性参数	280
8.4.4 气提反应器的流态	281
8.4.5 气、液、固三相传质	284
8.5 流化床反应器的数学模型	289
8.5.1 生物颗粒模型	289
8.5.2 反应器流动模型	290
8.5.3 流化床反应器的设计	291
8.5.4 流化床反应器的性能分析	292
8.6 高效生物反应器的限制因素	293

8.6.1	形成生物膜的限制条件	293
8.6.2	保留颗粒污泥或生物膜颗粒的条件	294
8.6.3	液-固传质的限制	294
8.6.4	固-液分离的限制	294
参考文献		295
第9章 氮和硫的生物循环及其在环境工程中的应用		298
9.1	氮和硫的循环原理及应用	298
9.1.1	氮元素在水环境中的循环过程	298
9.1.2	硫的自然和人工循环	298
9.1.3	硫的生物循环应用原理	300
9.2	利用氮循环开发的生物处理新工艺	302
9.2.1	短程硝化-反硝化和 SHARON 工艺	302
9.2.2	厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 工艺	304
9.2.3	SHARON 与 ANAMMOX 组合工艺	308
9.2.4	基于亚硝酸盐途径的完全自养脱氮 (CANON) 工艺	311
9.2.5	限氧自养硝化-反硝化 (OLAND) 工艺	312
9.2.6	同时硝化-反硝化 (SND) 工艺	315
9.2.7	生物脱氮技术的展望	317
9.3	硫循环的工程应用	318
9.3.1	沼气脱硫	318
9.3.2	天然气的生物脱硫	320
9.3.3	从石化炼油厂尾气中去除 H_2S 和回收硫	323
9.3.4	天然气和石化工业废气生物脱硫工艺的技术经济分析	325
9.4	从污染废水中同时去除 (和回收) 重金属和硫酸盐	326
9.4.1	基本原理	327
9.4.2	Budelco 锌厂等示范工程	327
9.5	烟气生物脱硫工艺	332
9.5.1	国外烟气生物脱硫技术的研究进展	332
9.5.2	国内烟气生物脱硫技术进展及配套设备的开发	336
9.5.3	Bio-FGD 工艺与 LSFO 工艺的技术经济比较	337
9.6	脱硫技术在采矿和冶炼领域的应用	337
9.6.1	采矿和冶炼废水污染的治理	337
9.6.2	金属选择性回收的原理和经济性	338
9.6.3	酸性矿井废水中金属的去除和回收	339
9.6.4	有色冶金工业废气的生物脱硫	341
参考文献		343
附录 本书常见术语缩写及中英文对照		347
索引		350

第 1 章 可持续发展的废水生物处理核心技术

1.1 厌氧生物技术的应用领域

1.1.1 厌氧处理在世界范围的成功

(1) 现代厌氧工艺的发展

南非早在 20 世纪 50~60 年代就采用生产规模厌氧废水处理技术处理高浓度工业废水，并且采用被认为具有升流式厌氧污泥床（UASB）反应器雏形的 Dorr-Oliver 反应器。甚至早在 20 世纪 60 年代，处理葡萄酒生产废水的反应器中的污泥就全部具有颗粒污泥特性，但遗憾的是，当时南非没有人认识和理解这一问题的重要性。

美国在 20 世纪 60 年代就对厌氧废水处理的工艺技术、微生物学、生物化学和数学模型进行了开拓性研究工作，其中最重要的工作是由 McCarty 小组所进行的关于厌氧滤池方面的工作。这些工作对现代厌氧工艺发展做出了巨大的贡献，使人们真正了解和开始开发厌氧污水处理技术。20 世纪 80 年代，Jewell 开发了一种非常有吸引力的生物固定化工艺，即厌氧接触膜膨胀床（AAFE）反应器。但是，他们的突破没有在美国引起足够重视，应用上没有取得进展。美国目前仅有很少人继续从事厌氧工艺研究，应用厌氧技术处理废水仍然存在阻力，其原因很大程度上来自传统好氧处理领域的专家对厌氧技术的偏见，他们不愿意深入理解厌氧处理技术巨大的潜在优势。

Lettinga 教授认为，美国和南非厌氧废水处理的历史经验表明，现有的专家（商业公司、学术界和政治家）往往是厌氧技术推广的障碍之一。

1970 年，Lettinga 等人首次进行了厌氧研究，他们利用 UASB 反应器预处理土豆淀粉废水，并在 70 年代早期进行制糖和土豆淀粉废水的小试和中试，在 4~5 年里成功地将 UASB 技术从实验室规模推向生产。1976 年，他们在荷兰 Halfweg 的 CSM 工厂建造了 200m³ 的示范 UASB 反应器，次年 1000m³ 的生产规模 UASB 反应器投入运行。

厌氧废水处理的应用在荷兰发展得非常成功，工业部门对厌氧工艺应用的阻力很小，很多污染企业也对厌氧处理逐渐产生兴趣。在荷兰，厌氧处理工艺首先在处理农产品工业废水方面取得了显著的进展，随后很快在林产品制造业和造纸工业废水处理方面取得了很大成功。目前，厌氧处理工艺对高含盐废水，如海产食品加工工业废水，以及成分复杂、有时存在毒性化合物的化工和石化工业废水的处理也取得了很大成功。这些进展归功于人们对微生物、生物化学知识和工艺技术的了解不断深入。

新的污染控制企业像 Paques、Biothane 和其他咨询公司成功地开发了厌氧技术的国际市场。在 20 世纪 80 年代和 90 年代，UASB 反应器已经成为厌氧工艺的主流。从 90 年代开始，与传统的 UASB 反应器相比有更高负荷的厌氧颗粒污泥膨胀床（EGSB）反应器得到应用。

(2) 现代厌氧工艺成功的原因

Lettinga 等人认为，厌氧处理技术，特别是 UASB 技术，在荷兰能在很短的时间内获得成功，是由于以下原因。

① 市场需求以及和工业界的良好合作。从 1970 年开始，欧洲的污染企业必须对其产生

的废水进行处理，从而在荷兰开始了与 CSM 制糖公司为代表的工业界的良好合作。

② 荷兰政府在政策和经费上的支持。

③ 多年来环境科学家与微生物领域科学家的良好合作关系，例如，Lettinga 等人与在 Wageningen 农业大学工作过的世界著名微生物学家 Zehnder 和 Stams 团队的良好合作。

目前，厌氧废水处理工艺在欧洲最成功的应用领域是工业废水处理。原因是厌氧废水处理和厌氧消化工艺可以创造产生和回收有用产品的条件，企业对经济有效的厌氧处理新技术的发展非常感兴趣，使之逐渐发展为工业工艺水封闭循环和废物循环，最终实现零排放，从而构成水和物质循环的核心方法。

1.1.2 厌氧处理的现实和潜在应用领域

厌氧反应器设计和运行技术的不断改善，使得许多早期认为限制厌氧发酵发展的缺点，例如稳定性差、温度要求高、对毒性敏感、对冲击负荷和进水组分适应性差等，得到了实质性的改变。厌氧技术的不断发展扩大了厌氧处理的应用范围，使得其应用不再局限于 20 世纪 50~60 年代处理城市污水污泥和 80~90 年代处理高浓度有机废水，而是扩大到基质和产物类型以及浓度变化更为广泛的范围。例如，目前即使在低温条件下，采用颗粒污泥膨胀床 (EGSB) 反应器，也可以处理浓度非常低 ($\text{COD}=100\text{mg/L}$) 的废水，而固体废物 (如生活垃圾) 可以采用“高固体”发酵技术进行厌氧处理。在处理介质和获得产物方面，也在不断扩展。例如，新的厌氧反应器可从含 SO_2 的废气中回收单质硫，从金属尾矿废水中回收重金属，从各种生物质中产生氢等。

但是，污泥对于新的难降解或有毒化合物仍然需要较长的适应时间，需要扩展厌氧微生物污泥代谢的多样性以及对难降解或有毒物质的适应性。

根据厌氧反应器新技术的发展，预计厌氧处理系统今后将成为真正低成本、环境保护可持续发展的核心技术。目前厌氧技术可以很好地用于处理各种不同类型的基质，并可以回收各种副产品。从图 1-1 可见，工业废水、城市污水、液体粪便 (畜禽和人类的)、城市污水污泥、固体粪便、垃圾和生物质 (包括能源作物) 均可采用厌氧消化工艺 (AnDi) 和高效厌氧废水处理技术 (AnWT) 进行系统处理。

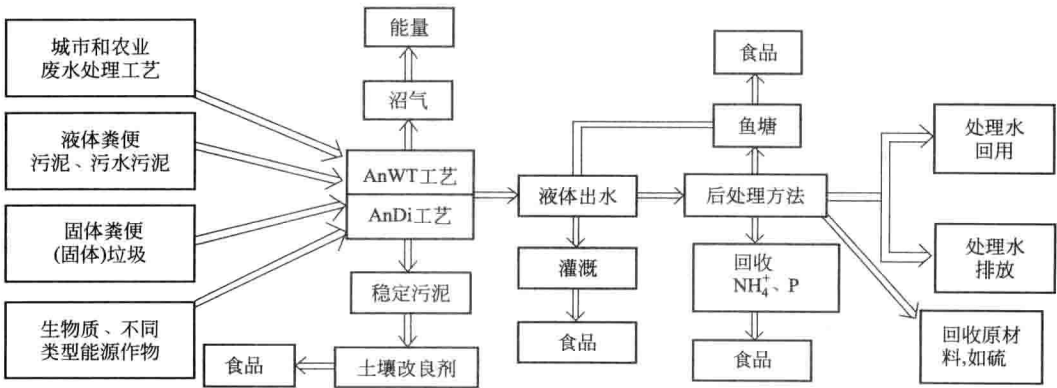


图 1-1 在环境和资源保护中 AnWT 和 AnDi 系统的关键作用

在厌氧工艺中，首先去除污染物，产生并回收能源。厌氧处理可有效地去除可生物降解的有机化合物，在溶液中形成矿化的化合物，如 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 S^{2-} 。这些物质可以通过直接农业利用或附加的后处理得以去除。因此，在后处理过程中，一些资源节约和资源回收技术得到