

## ► 1.1 环境生物技术

### 1.1.1 环境生物技术及其基本特征

近 30 年来,现代生物技术的原理和方法已经越来越多地渗透到环境工程领域中。美国国家科学和技术委员会 (National Science and Technology Council) 在 1995 年 12 月向美国政府提供的《21 世纪的生物技术:新的地平线》(Biotechnology for the 21st Century: New Horizons) 报告中认为,生物技术在解决与环境管理和质量保证有关的问题方面,所起的作用包括能对良好的生态系统进行评价,可将污染物转化成无害物质,能利用再生资源生产生物可降解材料,可开发对环境安全的产品加工工艺和废物处置技术。中国科学院生物技术局局长孟广震在庆祝《生物工程学报》创刊 10 周年(1994 年)的报告中指出,国际上认为 21 世纪生物技术产业化的十大热点中,有三项(环境监测、毒物的生物降解和生物塑料)属于环境生物技术的内容。我国国家环保局在“1995~2010 年科技发展思路框架”中也明确指出,要重点研究微生物工程处理技术,大力开展污染场地补救、修复等环境生物技术研究,以解决我国面临的许多环境难题。实际上,目前在几乎所有的生物技术或环境工程领域的大型国际会议中,环境生物技术都是一个主要专题。

环境生物技术 (environmental biotechnology), 也称为环境生物工程 (environmental bioengineering), 是近 20 年来发展起来的一门由现代生物技术与环境工程相结合的新兴交叉学科。德国国家生物技术研究中心 (GBF) 的 K. N. Timmis 博士认为以下 3 个方面属于环境生物技术范畴。

环境中应用的生物技术。

涉及环境中的某些可以看作一个生物反应器部分的生物技术。

作用于一些必须要进入环境的物质的生物技术。

按照 Timmis 的定义,环境生物技术是指应用于生物圈的某部分使环境得以控制或治理的技术,包括污染物的生物减少 (bio-elimination)、污染场地的生物修复 (bio-remediation) 生物可降解材料的开发和利用等。

1994 年,南京大学程树培在出版的国内第一本《环境生物技术》中提出,环境生物技术是直接或间接利用完整的生物体或生物体的某些组成部分或某些机能,建立起的降低或消除污染物产生的生产工艺,或者能够高效净化环境污染以及同时生产有用物质的人工技术系统。美国 Michigan 州立大学 J. M. Tiedje 认为,环境生物技术的核心是微生物学工程。还有一些学者给出了更简单和通俗的定义,认为环境生物技术就是应用于环境污染

治理方面的生物技术。因此，环境生物技术可以概括为以下两方面的内容。

(1) 生物净化指直接或间接地利用生物体的某些组织或某些功能，去除环境中已经存在的一些污染物质和有毒物质，使得环境得以净化。

(2) 生物生产指利用生物体作为反应器或利用活体生物的某些功能进行生物生产，以提供人类生产和生活所需产品和服务。这是一种最具可持续发展概念的生产技术，在资源日益紧张的今天具有重要意义。

以上可以看成环境生物技术改善环境质量的直接的和间接的两个方面。

### 1.1.2 环境生物技术的主要研究内容

由于环境问题存在复杂性和多样性，因此，环境生物技术的范围也极为广泛。到目前为止，环境生物技术涉及的学科包括分子生物学、环境化学、基因工程学、酶工程学、发酵工程学、化学工程学、环境生物学、环境毒理学、环境工程学、植物学、动物学、生态学、微电子学、计算机科学等。

对于环境生物技术涉及的具体领域，其研究内容会有所不同。例如，关于环境生物技术的研究内容，有学者从技术难度和理论深度的角度，提出环境污染物生物净化的三个层次。

(1) 现代环境生物技术是指以基因工程为主导的近代防治污染生物技术。包括构建降解杀虫剂、除草剂、多环芳烃类化合物等污染物的基因工程菌，创造抗污染型转基因植物等。这一层次知识密集，为快速、有效地防治污染开辟了新途径，使解决日益严重的大量环境难题成为可能。

(2) 传统的生物处理技术以污染物的生物处理为主要内容，包括在新的理论和技术支撑下开发的一系列废物强化处理工艺。这是目前广泛使用的治理污染的生物技术，仍在不断强化和改进，已为控制现环境质量起到了极其重要的作用。例如活性污泥法、生物膜法、生物流化床等，是目前广泛应用的主要环境污染物去除技术。

(3) 自然界的生物修复功能主要是包括氧化塘、人工湿地和农业生态工程等。其特点是最大限度地发挥自然界的生物环境功能，投资运行费用少，易于操作管理。

应该指出的是，以上三个层次没有重要与不重要之分，均是进行污染治理的不可缺少的技术手段。为解决日益严重的环境污染问题，需要三个层次的技术相互结合。

由于环境问题的复杂性，环境问题已不仅仅指污染一个方面，已拓展到能源、清洁生产等众多领域，生物技术在解决这些环境问题时有着得天独厚的条件，也得到迅猛的发展。

### 1.1.3 环境生物技术的主要发展进程

环境生物技术的发展与一系列重大环境污染问题的关系十分密切。在环境生物技术的发展过程中，一些代表性的研究和科学家对环境生物技术的发展起到了极为重要的作用。

#### 1.1.3.1 20世纪50年代末至60年代初期

Cornell大学的 Martin Alexander 对环境中的农药污染与残留问题，开展了农药在土壤中可降解性的研究，这是人们首次关注人工合成化学物质的环境效益。其后，他一直从事对不同的工业合成物及污染物在土壤中的可降解性的研究，且开辟了这一崭新的研究领域。

#### 1.1.3.2 20世纪70年代至今

环境生物技术极大发展，且其发展势头一直延续至今。环境污染物在其可生物降解性

和分析程度方面有了相当大的提高。Iowa 大学的 David. T. Gibson 和斯坦福 (Stanford) 大学的 Perry McCarty, Lily Y. Ylung 等人系统研究了芳香族化合物在好氧、厌氧条件下的分解情况, 并带动许多人投身到了这一领域中, 其中最著名的有德国的 Bernard Schink, K. N. Timmis, G. Fuchs 和荷兰农业大学的 A. J. B. Aehnder, Ladinger 等人。

分子生物技术和手段已广泛应用到了环境中可降解微生物及降解机理方面的研究。例如, 人们已经获得了二噁英分解菌、氯代有机物分解菌、分解石油的微生物等。

在英国现代生物公司出版的《生物技术现代观点》(current opinion in biotechnology) 杂志中, 每年的第三期为环境生物技术专刊, 其中的每篇文章均为环境生物技术某一专题的研究综述。统计 1992~1997 年该专刊上的所有文章和内容, 将其分为四部分, 即降解污染物的工程菌和抗污染型转基因植物的相关研究、无害化或无污染生物产品生产工艺的相关研究、危险性化合物的降解和污染场地的生物修复研究以及废水强化处理技术研究, 结果如表 1-1 所列。

表 1-1 《生物技术现代观点》杂志对环境生物技术内容的分类

文章内容所属范畴	文章数目点总数比例/%
降解污染物的工程菌和抗污染型转基因植物的相关研究	25.6
无害化或无污染生物产品生产工艺的相关研究	23.0
危险性化合物的降解和污染场地的生物修复研究	37.1
废水强化处理技术研究	14.3

从国内外的研究与应用现状可以发现, 目前环境生物技术最有应用前景的领域是高效的废水生物处理技术、污染事故的现场补救、污染场地的现场修复技术以及可降解材料的生物合成技术。我们可以以污染场地的生物恢复为例介绍环境生物技术研究内容。生物恢复是一种采用生物技术, 对已被污染物污染或由于生态系统的管理不善而被破坏的区域进行恢复的救急方法。目前, 生物恢复的优先研究内容包括 5 个方面。

探讨在环境变化和新的生存压力下微生物系统在结构和动力学方面的反应。

确定生化机理, 包括参与污染物好氧, 特别是厌氧降解的酶的作用途径。

深入了解生物遗传学, 以提高微生物降解污染物的能力。

对新的生物补救技术进行微观和宏观系统的实践研究, 从成本和效率角度确定技术的可行性, 并建立长期区域性研究的基地。

不断开发、试验和评价一些创新的生物技术, 如用于现场监测生物补救的传感器, 生物补救中的生物过程模型以及生物补救效能的可靠评价方法。

2000 年 7 月 9 日~13 日, 国际生物工程学会在日本京都召开了第五届国际环境生物技术学术研讨会 (International Society for Environmental Biotechnology)。会议的专题和论文情况如表 1-2 所列。

从表 1-2 可见, 氯代有机化合物的生物降解、石油污染的生物补救和废水生物处理等领域是研究者最感兴趣的方向; 其次是重金属去除、N 和 P 的代谢和去除、生物可降解聚合物一级固体废弃物处理等领域。

我国的环境生物技术处于刚刚起步阶段。目前, 我国环境生物技术的主要研究内容体现在以下几个方面。

生物反应器和固定化技术高效处理废水(物)的理论和应用研究。

废物资源化生物技术理论与工程应用研究。

表 1-2 第五届国际环境生物技术学术研讨会论文分布情况

专 题 题 目	口头发表论文数	墙报发表论文数	总 数
生物监测	16	14	30
重金属去除	9	18	27
植物补救	4	13	17
生物可降解聚合物	10	13	23
固体废物处理	11	12	23
石油污染的生物补救	17	26	43
废水生物处理	14	17	31
氯代有机化合物的生物降解	15	29	44
N 和 P 的代谢和去除	10	15	25
自然衰减和补救	5	10	15
CO <sub>2</sub> 、SO <sub>x</sub> 和 NO <sub>x</sub> 的固定或去除	7	7	14
生态系统的分析方法	5	7	12
生物共生作用	5	15	20
清洁技术	5	6	11
清洁能源	6	2	8
再生能源	5	6	11
厌氧条件下化合物的降解	5	0	5
环境分析的免疫测定技术	5	0	5
用于化合物降解的酶的代谢	0	3	3
其他(政府法规、危险评价、混合和循环系统等)	9	13	22

高效降解污染物的基因工程菌和抗污染型转基因植物的研究。

无害化或无污染生物生产工艺技术研究。

引入 DNA 扩增和其他生物技术的环境监测方法研究。

本书着眼于介绍前两方面研究内容，即立足于污染物处理和资源化利用过程中涉及的厌氧生物技术，着重阐述各种厌氧生物技术的工作机理和工程应用。污染物处理厌氧生物技术，主要包括废水（物）处理中从第一代、第二代到第三代厌氧处理工艺所涉及的技术；废物资源化厌氧生物技术，主要包括有机废液发酵法生物制氢技术、工业废物农用资源化生物技术和有机废弃物制取乳酸技术。

## ► 1.2 厌氧生物处理技术及其优越性

中国环境科学研究院等在《中国 2000 年水环境预测与对策研究》中指出，我国长江、黄河等七大江河 2000 年水质污染预测结果为 COD 的污染质量负荷比为 99.5%，这表明我国水污染的主要污染物是有机污染。因此，解决我国水污染的主要目标是控制有机污染。有机污染治理的最佳技术是采用生物处理技术，它比化学和物化处理技术效果好而且处理费用低。同时，很多废水（物）采用厌氧生物处理技术比好氧生物处理技术更具优越性，为消除环境有机污染开辟了一条高效低耗的新途径。

### 1.2.1 选择废水（物）厌氧处理技术的依据

有机废水（物），尤其是高浓度有机废水（物）的处理方法，主要取决于废水（物）的性质。按性质大致可以分为以下三大类。

(1) 易生物降解的废水（物）主要来自农牧产品和禽畜粪便等，如轻工食品发酵废水和禽畜饲养排放的废液等。这类废水（物）有机物浓度高，且可利用成分多。

(2) 难生物降解的有机废水(物)主要来自化学工业、石油化工和炼焦工业等,如制药厂、染料厂、人造纤维厂、焦化厂等。

(3) 有害有机废水(物)主要来自化学工业和发酵工业,如味精废水、糖蜜酒精废水等。这类有机物可能是易于生物降解的,但由于废水中含有某些有害物质,如重金属、高氮、高硫等,对微生物有毒害作用。

对于第一类有机废水(物),其有机组分主要是糖类、蛋白质和脂类。这类高浓度有机废水(物)的治理,由于有可回收有用物质,如玉米酒精废液采用蒸发浓缩技术回收干酒精糟,应优先考虑采用厌氧处理技术,不仅效能高,能耗低,并能回收大量生物能。对于第二类高浓度有机废水(物),由于主要是难生物降解的高分子有机物,单独采用好氧生物处理技术往往达不到满意的处理效果,而采用厌氧技术则可提高其可生化性或可降解性。因此,采用厌氧-好氧串联工艺是最佳选择。对于第三类高浓度有机废水(物),首先要通过适当的化学或物化法预处理,去除废水中有毒有害物质,仍可采用厌氧生物处理技术。

可见,对于高浓度有机废水(物),应优先考虑采用厌氧生物处理技术,作为去除有机物的主要手段。高浓度有机废水(物),仅通过厌氧生物处理工艺,出水往往达不到排放标准,仍需后续采用好氧生物处理工艺。因此,对于高浓度有机废水(物)采用以厌氧生物处理工艺为主,好氧生物处理工艺为辅的技术路线是理想的选择。

## 1.2.2 废水(物)处理厌氧生物技术

### 1.2.2.1 第二代废水(物)厌氧处理生物技术

厌氧生物处理技术的典型特征是处理能力大、易于调控、效率高、成本低等。20世纪70年代,环境工程界提出高效厌氧生物处理工艺的技术关键是:(a)在反应器中维持高浓度生物量,使活性污泥停留时间与废水停留时间分离,具体的措施包括加入填料形成生物膜、培育颗粒污泥等;(b)反应器中生物与废水充分接触,这需要设计合理的布水系统,采用很高的液体上升流速,或在处理高浓度有机废水时利用产生的沼气。基于此,从20世纪70年代起,国际上出现了第二代厌氧生物处理工艺,它们的基本特征如下。

具有相当高的有机负荷和水力负荷,反应器容积比传统工艺减少90%以上。

在不利条件(低温、冲击负荷、存在抑制物)下仍具有高的稳定性。

反应器投资小,适合各种规模和可被结合在整体的处理技术中。

处理低浓度废水的效率已具备与好氧处理的竞争能力。

可以作为能源净生产过程。

第二代厌氧生物处理工艺已经在世界各国得到了成功应用。其中,应用最为广泛的当属升流式厌氧污泥床(upflow anaerobic sludge blanket, UASB)工艺,其应用率达到了工业化厌氧反应器的65%。第二代厌氧处理工艺就微生物主体而言,可以分为以下5种生物技术。

(1) 颗粒化活性污泥处理技术以 Lettinga 等人研究开发的 UASB 反应器为典型代表。根据 Hulshoff 等人的分类,有以下 3 种颗粒化活性污泥:(a) 紧密球形颗粒,主要由杆菌、丝状菌组成,亦称“杆菌颗粒”,颗粒直径约 1~3mm;(b) 类球形颗粒,主要由松散互卷的丝状菌组成,丝状菌附着在惰性离子上,所以也称为“丝状颗粒”,颗粒直径约 1~5mm;(c) 球状小颗粒,主要由甲烷八叠球菌组成,颗粒直径约 0.1~0.5mm。颗粒化活性污泥法成功的关键取决于污泥的颗粒化程度和周期。影响污泥颗粒化的因素主

要有如下几点。

废水水质。

反应器的结构和设计参数。Lettinga 等人研究开发的 UASB 反应器，其最主要的组成部分是相分离器，由于其良好的水力混合、三相分离特性，从而能培养出活性高、沉降性能好的厌氧颗粒污泥。太原工业大学的苏玉民等人研究了脉冲上流式厌氧污泥床反应器的性能，认为间歇式脉冲配水系统配水迅速、均匀，水力搅拌性能好，可缩短污泥颗粒化过程。

运行操作条件。HRT 较小，则上流速度大，有助于反应器内细小分散污泥的洗出，从而利于颗粒化的完成，高的上流速度下形成的颗粒污泥也较大。布水方式不同，反应器内水流方式及速度不同，对絮体污泥选择性洗出的强度也不相同，一般来说反应器上流速度较大，搅动强烈均匀，有利于污泥颗粒化的尽快形成。

对于 UASB 厌氧反应器来说，只有形成了颗粒污泥才能保持高生物量、承受更高的负荷，成为高效、高速厌氧反应器。颗粒污泥体积小，其污泥指数一般在 10mL/g 左右，沉降性能好，既增加了反应器中污泥贮量，又不易流失，反应器负荷可达 30kg COD/(m<sup>3</sup>·d) 左右。采用颗粒化污泥处理废水的研究工作，已取得长足进步，在实际废水处理工程中也取得较为满意的效果。北京环保所对酒精废水、屠宰废水、对苯二甲酸废水处理的研究成果如表 1-3 所列。

表 1-3 颗粒化污泥处理技术的部分研究成果

废水种类	种 泥	废水 COD /(mg/L)	负荷/[kg/ (m <sup>3</sup> ·d)]	COD 去除 率/%	温度 /°C	进水 pH 值	培养负荷 /[kg/(m <sup>3</sup> ·d)]	颗粒直径 /mm	装置容积 /L
酒精废水	消化污泥 厌氧池污泥	19000~28000	22.3	90.8	38~41	4.3~5.0	0.2~0.4	1~3	24×10 <sup>3</sup>
屠宰废水	污泥消化液	1000~1900	4.5	70~80	<25	6.0	—	0.5~2	20×10 <sup>3</sup>
对苯二甲 酸废水	污泥消化池污泥	4304~9876	5.1~7.4	90	35~37	6.0	0.1~0.3	0.1~0.3	20×10 <sup>3</sup>

日本的稻森悠平等人为提高脱氮效果，开发出一种与填充陶粒滤料相组合循环式颗粒化污泥生物膜法处理酿造废水，当进水 BOD 为 1000mg/L、COD 负荷为 10g/(m<sup>3</sup>·d)、TN 负荷为 0.4kg/(m<sup>3</sup>·d) 时，其 BOD 与氮的去除率分别为 98% 和 70%。该种工艺适宜于高蛋白食品工业废水的处理。

(2) 固定化酶和固定化微生物处理技术从筛选、培育获得的优良菌种体中提取活性极高的酶，再用包埋法（或交联法、载体结合法、逆胶速酶反应系统）等方法将酶固定在载体上，制成不溶于水的固态酶，即固定化酶。

固定化酶对大分子降解能力强，对小分子无分解能力，目前固定化酶的研究多限于简单的胞外酶——水解酶类、少数胞内酶，多酶体系的固定化技术尚未解决；由于废水的组分复杂易变，因此，要用多种单一的固定化酶，包括胞外酶和胞内酶组合处理，才能完成某一物质的多步骤反应，使有机物完全无机化和稳定化。如德国将 9 种降解对硫磷农药的酶固定多孔玻璃珠、硅胶珠上，制成酶柱处理对硫磷废水，获得 95% 以上的去除效果，连续工作 70d 酶的活性没有变化。

就目前的水平，用固定化酶处理废水成本高，有的固定化酶的活性半衰期为 20d，它的使用寿命为 1~2 年，它的机械强度较一般的硬质载体差，在酶布或酶柱上容易长杂菌，

有杂菌污染等问题，这些都是目前期待解决的问题。

20世纪80年代起，我国在废水生物处理方面进行固定化酶及微生物处理废水的研究，从好氧活性污泥和厌氧活性污泥中分离、筛选对某一种废水成分分解能力强的微生物，将其固定化用于废水处理实验，如含氰废水、印染废水的脱色及含酚废水等的固定化微生物处理的小型实验研究。

以与固定化酶相同的固定方法将酶活力强的微生物固定在载体上即成固定化微生物，其中尤以凝胶包埋法最适合。该方法采用高分子凝胶之类的包埋剂，把活的微生物包埋住，即人为地形成固定化微生物污泥颗粒，以防止微生物从反应器中随水流带出，从而保持反应器内的微生物高浓度化。包埋固定化微生物处理废水的机理与颗粒化污泥处理类似。所不同的是，前者是人为地将微生物体固定住，后者是微生物自身固定成颗粒化污泥。

包埋固定化微生物处理的优越性有以下几点：(a) 反应器中微生物浓度大大提高；(b) 固液分离简便迅速；(c) 能利用特种微生物；(d) 被包埋起来的微生物受毒物侵害少；(e) 剩余污泥量少。

目前包埋固定化微生物处理尚存在以下的问题：(a) 低费用、低阻力、高强度优良包埋剂的开发；(b) 被包埋微生物浓度的测定，有效微生物的获取手段；(c) 关于被包埋微生物与周围介质的传质动力、传质方式、传质效率方面的理论知识还需进一步探讨；(d) 高浓度SS废水的处理等各种问题。该方法尚处于实验室研究阶段，未能取得在实践中的推广应用。

(3) 特定微生物选育与强化处理技术作为废水处理的特定微生物，通常是指细菌、藻类、酵母、微小动物等中的某些微生物，其在净水工艺中既可净化污水，同时又可生产有价值的副产物。普通活性污泥法所产剩余污泥中，虽然所含蛋白质达40%~50%，但由于采用的是多种微生物混合体系的运行方式，有用资源的纯度差，难于利用，其价值不大，最多只能作肥料使用。而采用特定微生物法处理，是以特定微生物的纯种培养的运行方式，所得产物易于加工利用。

特定微生物的主要特点可归纳如下：(a) 在处理过程中所产微生物菌体，可作蛋白资源有效利用；(b) 可设定微生物最适宜的生活条件，管理方便；(c) 可处理废水；(d) 对特定基质(难于用常规法处理的基质)的分解活性显著。以酵母菌处理为例，阐明其工艺特点。酵母菌是作为味精、酱油、造酒等酿造业用来对高浓度基质进行发酵的微生物。近年来，人们利用酵母菌对某些食品工业废水的高浓度污染物质进行净化处理，而研制开发出一种新型工艺，这种污水净化工艺具有一些明显的优越特性。

负荷高、稳定性好。利用酵母菌净化污水与普通活性污泥法相比，其F/M之比值要高得多。由酵母菌净化污水工艺的F/M之比与BOD去除率的关系可知，最适宜的F/M之比为1~2kg COD/(kg 酵母·d)，该工艺能在比活性污泥法的负荷高3~5倍的条件下运行，并且对负荷的变化也有很好的适应能力，运行稳定。

污泥沉降性能好。酵母菌净化污水工艺所产生的絮凝体的机理，不同于活性污泥法的聚合物凝集作用而形成的菌胶团，它是通过酵母菌丝、假菌丝的物理网络作用而形成的，其颗粒较大，粒径可达5mm以上，沉降性能优越，污泥指数50~60mL/g，为普通活性污泥的1/2。

剩余菌体量少。剩余菌体的量按照干固体计算为0.2kg/kg BOD，是活性污泥法

(0.4~0.6kg/kg BOD) 的 1/3。这意味着酵母菌氧化有机物所获得能量均以反应热形式释放出来，生成污泥所耗能量减少。

剩余菌体能有效利用。由于酵母菌体中含有丰富的维生素等有益物质，所以剩余菌体可回收利用，变废为宝。

特定微生物处理存在的最大问题即特定纯菌种的选择，纯菌种在实验室中比较容易提取，但接种培养、繁殖增长速度、反应过程中的保纯等许多方面尚需进一步研究和完善，而且其如何在实际工程中投菌应用、所采取的工艺等问题也应当随着研究同步进行。

(4) 光合细菌处理技术  $BOD_5$  在 10000mg/L 以上的废水可用有机光合细菌 ( photosynthetic bacteria, PSB) 处理。因有机光合细菌只能利用脂肪酸、氨基酸等低分子化合物，所以在有机光合细菌处理废水之前，要用水解细菌将高分子物质酸化，这样可得到较好的处理效果， $BOD_5$  去除率可达 95% 以上。其处理工艺见图 1-1。

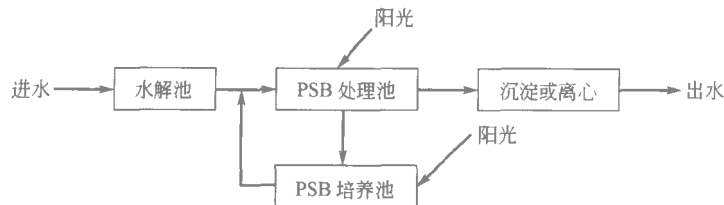


图 1-1 PSB 处理高浓度废水的工艺流程

(5) 生物膜处理技术近年来，生物膜反应器以其独特的优势受到广大研究者和工程设计者的关注，涌现出大量新型的单一或复合式生物膜反应器，如复合式活性污泥生物膜反应器、序批式生物膜反应器、升流式厌氧污泥床 - 厌氧生物滤池等。厌氧生物膜反应器，不仅适用于城市生活污水和低浓度有机废水，更适用于进水  $BOD$  浓度高达 15000mg/L 的废水的处理；容积负荷率高，一般可达  $5\sim 10\text{kg COD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ；在去除有机物  $COD$  的同时，可产生  $0.35\sim 0.45\text{m}^3/\text{kg COD}$  的沼气；耐冲击负荷能力极强。

生物膜反应器不可避免地存在着一定的不足，如需要较多的填料和支撑结构，使得基建投资超过活性污泥法；出水中常常携带较大的脱落的生物膜碎片，使处理水的澄清度降低；厌氧生物膜反应器启动周期较长且处理后出水在色度、悬浮物浓度、 $COD$  等方面往往达不到排放标准等，所以厌氧生物膜反应器往往与其他的后续处理工艺相结合形成整套处理工艺。当然综合比较起来，生物膜反应器还是具有活性污泥法等其他处理工艺不可替代的优势。

本书第 4~6 章将分别阐述第二代厌氧处理工艺的相关生物技术。

### 1.2.2.2 第三代厌氧处理生物技术

20 世纪 80 年代的研究和实践发现，以 UASB 为代表的第二代厌氧生物处理工艺存在一些缺点，如在结构方面，高径比小，因而占地面积大；UASB 增加截面积的放大方式难以在大规模反应器中实现均匀布水；UASB 三相分离器的稳定操作较为困难。在操作方面，UASB 启动时间较长，液体上升流速小，液 - 固混合较差（特别是在低温、低浓度条件下）；负荷较高时，污泥易流失，易造成有毒难降解化合物、非活性物质的吸附和积累。因此，20 世纪 90 年代国际上出现了第三代厌氧生物处理工艺，包括厌氧膨胀颗粒污泥床 (EGSB)、厌氧内循环 (IC) 反应器、升流式厌氧污泥床过滤器 (UBF) 等。第三代厌氧生物处理工艺均是在 UASB 基础上发展起来的，其共同特点包括如下几点。

微生物均以颗粒污泥固定化方式存在于反应器中，反应器单位容积的生物量更高。能承受更高的水力负荷，并具有较高的有机污染物净化效能。具有较大的高径比，一般在 5~10 以上。

占地面积小，动力消耗少。

特别要指出的是，第三代厌氧反应器在低温条件下处理低浓度有机废水比 UASB 有明显的优势。本书第 7 章将详细阐述第三代厌氧处理工艺中的相关生物技术。并在第 8 章介绍新型生物脱氮除磷工艺短程硝化 - 反硝化 (shortcut nitrification-denitrification)、同步硝化 - 反硝化 (simultaneous nitrification-denitrification)、厌氧氨氧化 (anaerobic ammonia oxidation, ANAMMOX) 等工艺中的相关厌氧生物技术。

### 1.2.3 厌氧生物处理的技术优越性和缺点

#### 1.2.3.1 厌氧生物处理技术的优越性

(1) 节省动力消耗由于厌氧生物处理过程中，细菌分解有机物是营无分子氧呼吸，故不必给系统提供氧气。而好氧菌降解有机物是营分子氧呼吸，必须提供分子氧。理论上完全氧化 1kg BOD 必须提供 1kg 分子氧。好氧生物处理通常利用空气进行充氧。空气中的氧通过曝气设备把空气充到水中，首先是空气中的氧转移到水中，然后水中的氧再传递到好氧菌细胞内进行代谢，由于气膜液膜的阻力，氧的传递效率不是很高，一般的曝气设备，充 1kg 氧到水中约需消耗 0.5~1.0kW·h 电力。即要完全氧化废水中 1kg BOD<sub>5</sub>，约需消耗 0.5~1kW·h 电力。1990 年我国的城市废水排放总量已达  $3.54 \times 10^{10} \text{m}^3/\text{a}$ ，如废水的平均 BOD 以 200mg/L 计，BOD 去除率以 90% 计，要把这些 BOD 用活性污泥法去除，每年的耗电将达  $(31.86 \sim 63.72) \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ ，如在南方地区的城市生活废水采用厌氧技术作为预处理，按 BOD 去除率 70% 计，则可节省大量电能。巴西和哥伦比亚等国已采用 UASB 反应器处理城市废水，并取得了很大成功。

对于高浓度有机废水（物），采用厌氧生物处理技术节省的电耗更是大得惊人，如目前我国轻工业的造纸、食品发酵、皮革、制糖等行业每年排出的 BOD 达 200 万吨。如采用厌氧工艺，以去除 BOD 80% 计，则年节电达  $(8.0 \sim 16) \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。环境效益与经济效益十分显著。

(2) 厌氧生物处理技术可以产生生物能污泥消化和有机废水（物）的厌氧发酵能产生大量沼气。而沼气的热值很高，可作为能源利用。早在 20 世纪 20~30 年代，人们已开始有计划地利用有机质生产沼气，作为炊事和供热用。在城市污水处理厂中，把初沉池和二沉池的污泥进行消化，不仅是为了稳定污泥，而且是为了利用污泥消化过程产生的沼气，供消化池污泥加热和发电，为水泵和鼓风机提供电力。根据资料介绍，发达国家的城市污水处理厂的污泥厌氧消化所产生的沼气转化的电能可解决处理时所需电力的 33%~100%，如表 1-4 所列。

表 1-4 若干发达国家污水处理厂能源回收自给率

污水处理厂	伦敦 贝克福	德国 汉堡	美国 洛杉矶	法国 阿谢尔	意大利 罗马水区	日本某 处理厂
全厂电力自给率/%	57.3	100	77.5	58	50	33

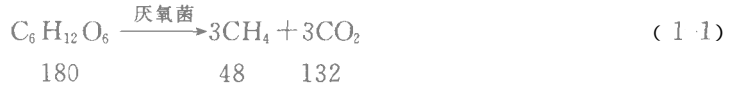
注：引自冯孝善，方士·厌氧消化技术，1989。

我国青岛市海泊河污水处理厂利用污泥消化产生的沼气作为能源取得了很大成功，他们利用沼气产生的热能和电能可满足污水厂供热量的 80%~90%和曝气池供氧用电量的

50%以上，达到了国际水平。

有机物转化为沼气的 3 种计算方法如下。

按有机物厌氧消化转化为沼气的理论计算方法。以葡萄糖厌氧发酵产沼气为例，假定不考虑厌氧菌的细胞合成所需的有机物，其生化反应方程式如下：



根据式 (1-1)，1kg 葡萄糖  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  被完全分解为  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  可产生 0.267kg  $\text{CH}_4$  和 0.733kg  $\text{CO}_2$ ，相当于 16.67mol  $\text{CO}_2$ ，在标准状况下 ( $0^\circ\text{C}$ , 101.33kPa)，可产生  $22.4 \times 16.67 \times 2 = 746.8\text{L}$  沼气，约可产生  $0.75\text{m}^3$  沼气。

采用上述计算方法，可以计算出各种有机物的甲烷、二氧化碳和沼气的产量，如表 1-5 所列。

表 1-5 几种有机物完全消化的  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  及沼气产量

有机物种类	成分(质量分数)/%		每千克有机物产气量/ $\text{m}^3$	
	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	沼气	$\text{CH}_4$
糖类	27	73	0.75	0.375
脂类	48	52	1.44	1.04
蛋白质	27	73	0.98	0.49

注：气体体积以在标准状况下 ( $0^\circ\text{C}$ , 101.33kPa) 计算。

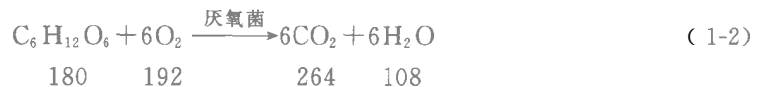
由表 1-5 可知，糖类厌氧发酵时，沼气产量较低，沼气中甲烷含量也较低，脂类产气量较高，沼气中甲烷含量也较高。表 1-5 中所列数据为理论值，由于温度、压力等不同，沼气产量会有所不同。同时由于在相同温度和压力下  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  在水中的溶解度各不相同 (见表 1-6)，因此，不同条件下的沼气表观产气量和  $\text{CH}_4$  与  $\text{CO}_2$  所含的比例与理论值有差别。

表 1-6 不同温度下  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  每升水中的溶解度

温度/ $^\circ\text{C}$	$\text{CH}_4$ 溶解度/mL	$\text{CO}_2$ 溶解度/mL	温度/ $^\circ\text{C}$	$\text{CH}_4$ 溶解度/mL	$\text{CO}_2$ 溶解度/mL
0	55.6	1713	20	33.1	878
10	41.8	1194	30	27.6	665

注：分压均为 101.33kPa。

② COD 转化为沼气的理论计算方法。在实际废水处理中，常采用 BOD 或 COD 来表示有机物的含量，而不去测定具体有机物。用 COD 指标代表废水中有机物含量更加方便。1kg COD 厌氧发酵产生的甲烷量，如不考虑微生物合成，则可按 1kg 葡萄糖完全氧化所含的 COD 进行计算。



由式 (1-2) 可计算出氧化 1kg 葡萄糖需要  $192/180 = 1.067\text{kg}$  氧，即 1kg 葡萄糖的 COD 为 1.067kg。

根据式 (1-1) 和式 (1-2) 则可计算 1kg COD 厌氧发酵产生的  $\text{CH}_4$  质量为：

$$\frac{\text{CH}_4(\text{kg})/\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{kg})}{\text{COD}(\text{kg})/\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{kg})} = \frac{48/180}{192/180} = 0.25\text{kg CH}_4/\text{kg COD}$$

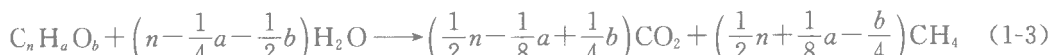
即 1kg COD 去除可产生  $\text{CH}_4$  0.25kg。在标准状况下 ( $0^\circ\text{C}$ , 101.33kPa)，其体积为：

$$\frac{250}{16} \times 22.4 = 350\text{L}$$

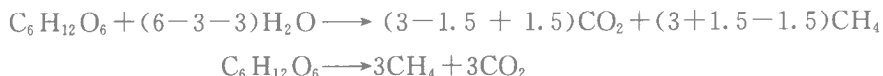
同样，1kg COD 完全厌氧发酵可产生 350L CO<sub>2</sub>。

通过上述理论计算，1kg COD 完全厌氧消化在标准状况下可得到沼气 (CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>) 0.70m<sup>3</sup>。

Buswell 和 Mualler 的计算方法。Buswell 和 Mualler (1952) 也提供了有机物 C<sub>n</sub>H<sub>a</sub>O<sub>b</sub> 厌氧发酵产生 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的反应式。该反应方程式如下：



用葡萄糖为例，分子式各元素下标代入式 (1-3) 可得：



由此可知式 (1-3) 与式 (1-1) 完全相同，可见式 (1-3) 可代表各种有机物厌氧发酵转化为沼气更为普遍的一般式。当然该反应式也未考虑细菌细胞合成所消耗的有机物量，只反映有机物厌氧消化全部转化为甲烷和二氧化碳的理论值。因此，只要知道有机物 C<sub>n</sub>H<sub>a</sub>O<sub>b</sub> 的分子式，就可求出该有机物厌氧发酵 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的理论产量。

求出有机物厌氧转化为甲烷和二氧化碳的理论值，对科学研究和生产实践有理论指导意义。不仅可作为厌氧消化工程估算产气量的理论依据，并可以判别厌氧反应器的运行是否正常。便于及时发现问题，采取正确的对策。

分析沼气的能源价值可见，1mol 甲烷燃烧可产 882.58kJ 热量。在标准状况 (0℃, 101.33kPa) 下，每立方米甲烷可产生热量 39400.8MJ，理论上相当电量 10.94kW·h (1.0kW·h=3.6MJ)。

据有关资料提供的数据，效率较高的沼气发电机，只能把沼气总含能量的 30% 左右转化成电能，并可把总含能量的 40% 左右以余热的形式回收，其余的能量以各种形式被损失掉。利用沼气发电，其能源的收支情况可用图 1-2 表示。

城市污水厂的污泥厌氧消化，含水率 96% 的污泥，每立方米污泥可产沼气约

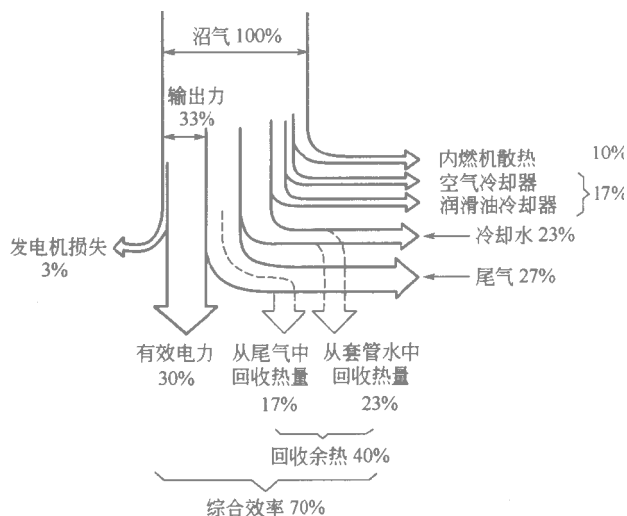


图 1-2 沼气发电机的能源收支

8~12m<sup>3</sup>。视污泥中有机物含量不同有所差别，其热值一般为 20~24MJ/m<sup>3</sup>（沼气），每立方米沼气约可发电 1.5~13.8kW·h，并可回收余热约 8~9MJ。利用沼气发的电可给本厂使用，其所产生的余热可作为消化池加热用，也可用于热水供应及采暖。

我国轻工业的造纸、食品发酵、皮革、制糖和日化五大行业年排高浓度有机废水达 40 多亿立方米，含 BOD<sub>5</sub> 量约 200 万吨，COD 量约达 285 万吨。如果将 1/2 的 COD 量用于厌氧发酵，假定 COD 去除率为 70%，则每年可产沼气约达 14×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>，其发热量相当于 70 万吨标准煤，如果用于发电，可得到 (21~25.2)×10<sup>8</sup>kW·h/a，同时可回收 112~126MJ/a 余热，其能源价值十分可观。

(3) 厌氧生物处理的污泥产量少厌氧菌世代期长，如产甲烷菌的倍增时间约 4~6d。所以厌氧产率系数 Y 值比好氧小，表 1-7 列出了几种废水好氧处理污泥的产率系数。表 1-8 给出了不同有机物甲烷发酵的产率系数 Y 值。

表 1-7 几种废水好氧处理污泥的产率系数 Y 值

废 水 名 称	Y/(kg VSS/kg BOD <sub>5</sub> )	废 水 名 称	Y/(kg VSS/kg BOD <sub>5</sub> )
合成纤维废水	0.38	酿造废水	0.93
亚硫酸盐浆粕废水	0.55	制药废水	0.77
含酸废水	0.70	生活废水	0.5~0.65

表 1-8 不同有机物甲烷发酵的产率系数 Y 值

有机物种类	化学分子式	Y/(kg VSS/kg COD)	有机物种类	化学分子式	Y/(kg VSS/kg COD)
碳水化合物	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>5</sub>	0.20	生活废水	C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> O <sub>3</sub> N	0.077
蛋白质	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> N <sub>4</sub>	0.056	乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	0.077
脂肪酸	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	0.042	甲醇	CH <sub>4</sub> O	0.11

有机物在好氧降解时，如碳水化合物，其中约有 2/3 被合成细胞，约有 1/3 被氧化分解提供能量。厌氧降解时，只有少量有机物被同化为细胞，而大部分被转化为 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>。所以好氧处理产泥量高，而厌氧处理产泥量低，且污泥已稳定，可降低污泥处理费用。

(4) 对氮和磷的需要量较低氮和磷等营养物质是组成细胞的重要元素，采用生物法处理废水，如废水中缺少氮磷元素，必须投加氮和磷，以满足细菌合成细胞的需要。

前已述及，厌氧生物处理要去除 1kg BOD<sub>5</sub> 所合成细胞量远低于好氧生物处理，因此可减少 N 和 P 的需要量，一般情况下只要满足 BOD<sub>5</sub> : N : P = (200~300) : 5 : 1。对于缺乏 N 和 P 的有机废水采用厌氧生物处理可大大节省 N 和 P 的投加量，使运行费用低。

(5) 厌氧消化对某些能降解的有机物有较好的降解能力随着化学工业的发展，越来越多的自然界本来没有的有机化合物被合成。据估计，有机化合物总数已超过 500 万种，并且还继续以很快的速度不断合成新的有机物，这些人工合成的有机物大多产自制药、石油化工、有机溶剂和染料制造等工业。这些新问世的有机物，有些是可以生物降解的，有些则是难于生物降解的或不能生物降解的，甚至是有毒的，有些则会通过水环境食物链富集积累，危害严重的会有致癌、致畸、致突变的可能。这些有毒物进入常规的好氧废水生物处理系统，不仅得不到理想的处理效果，而且对微生物产生毒害，影响生物处理的正常进行。

实践证明，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满意的

处理效果，如炼焦废水、煤气洗涤废水、农药废水、印染废水等。而采用厌氧生物法则可取得较好的处理效果。近年来，经研究发现厌氧微生物具有某些脱毒和降解有害有机物的功效，而且还具有某些好氧微生物不具有的功能，如多氯链烃和芳烃的还原脱氯，芳香环还原成烷烃环结构或环的断裂等。

用厌氧处理工艺作为前处理可以使一些好氧处理难以处理的难降解有机物得到部分降解，并使大分子降解成小分子，提高了废水的可生化性，使后续的好氧处理变得比较容易。因此，常常使用厌氧 - 好氧串联工艺来处理难降解的有机废水。

#### 1.2.3.2 厌氧生物处理技术的缺点

(1) 采用厌氧生物法不能去除废水中的氮和磷采用厌氧生物处理废水，一般不能去除废水中氮和磷等营养物质。含氮和磷的有机物通过厌氧消化，其所含的氮和磷被转化，其所含的氮和磷被转化为氨氮和磷酸盐，由于只有很少的氮和磷被细胞合成利用，所以绝大部分的氮和磷以氨氮和磷酸盐的形式在出水排出。因为氮和磷是营养物质，排入水体可引起湖泊发生富营养化，虽然厌氧法在去除 COD 和 BOD 方面具有高效低耗的优点，但因不能去除氮和磷，使该法的应用存在局限性，当被处理的废水含有过量的氮和磷时，不能单独采用厌氧法，而应采用厌氧与好氧工艺相结合的处理工艺。

(2) 厌氧法启动过程较长因为厌氧微生物的世代期长，增长速率低，污泥增长缓慢，所以厌氧反应器的启运过程很长，一般启动期长达 3~6 个月，甚至更长。如要达到快速启动，必须增加接种污泥量，这就会增加启动费用。在经济上是不合理的。

(3) 运行管理较为复杂由于厌氧菌的种群较多，如产酸菌与产甲烷菌性质各不相同，而互相又密切相关，要保持这两大类种群的平衡，对运行管理较为严格。稍有不慎，可能使两种群失去平衡，使反应器不能正常工作。如进水负荷突然提高，反应器的 pH 值会下降，如不及时发现控制，反应器就会出现“酸化”现象，使产甲烷菌受到严重抑制，甚至使反应器不能再恢复正常运行，必须重新启动。

(4) 卫生条件较差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而放出硫化氢等气体。如硫化氢是一种有毒和具有恶臭的气体，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做成密封，以防臭气散发。

(5) 厌氧处理去除有机物不彻底厌氧处理废水中有机物时往往不够彻底，一般单独采用厌氧生物处理不能达到排放标准，所以厌氧处理必须要与好氧处理相配合。

(任南琪、王爱杰编写)

## ► 2.1 厌氧可处理性原则与要点

### 2.1.1 厌氧可处理性原则

在废水（物）处理的研究和应用中，虽然已经证实厌氧微生物可以适应复杂的基质并能耐受毒性，但是，这很大程度上还取决于驯化活性污泥的时间。一般来说，活性污泥适宜的驯化时间是 30~60d；若没有达到一定的驯化时间，则很难对废水（物）的厌氧可处理性下结论。

McCarty 等人开发出一种测定有机物厌氧生物转化潜力的方法，称为生物化学甲烷势（biochemical methane potential, BMP）。BMP 用于表征在厌氧过程中有多少有机污染物可以被降解，其原理与 BOD 表征好氧过程中有多少有机污染物可以被降解相似。McCarty 等人还开发出一种简单实用的评价废水（物）对厌氧微生物潜在毒性的测定方法，即厌氧毒性测定（anaerobic toxicity assay, ATA）。操作方法如下：将厌氧微生物置于血清瓶中，用体积比为 1:1 的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 混合气吹扫血清瓶，以除去瓶中的空气，用盖子封住瓶口；将水样注入各血清瓶并依次增加各瓶水样体积，使废水对开始接种的厌氧微生物有不同的稀释程度。除注入水样外开始时还要在血清瓶中加入适量的基质以防止微生物生长受到限制。通过气体产率的减少量和水样体积成正比的原理可以反映出水样是否对微生物有毒性。

尽管 BMP 和 ATA 可以初步估测有多少 COD 可以生物转化为甲烷，以及废水（物）是否有毒性，但是，对 BMP 和 ATA 测定的数据应该进一步分析。如果活性污泥未经合理的驯化步骤，BMP 测定很可能给出否定的结果。因此，BMP 和 ATA 的测定结果不能直接作为工程设计准则。设计准则应尽可能取自模型试验，试验规模应尽可能大一些以减少试验放大产生的问题。应该注意的是，模型反应器的构型应尽可能模拟生产性设施要采用的工艺，还应该模拟连续进水和负荷率的变化。

为了确定处理特定废水（物）适宜的厌氧生物技术，必须了解以下问题：（a）所用水样的代表性；（b）可以转化为甲烷的 COD 量；（c）COD 转化为甲烷的速度；（d）出水水质要求；（e）反应是否产生硫化物；（f）生产规模反应器要求的温度；（g）产生的碱度值；（h）废水（物）中是否存在有毒物质；（i）废水（物）中有毒物质的可生物降解性；（j）微生物相对于有毒物质的可被驯化程度；（k）转化单位重量 COD 生物体的净产量；（l）生物固定化方式；（m）N、P 和 S 的需求量；（n）是否需要补充微量元素等。

### 2.1.2 厌氧可处理性参数

(1) COD 转化为甲烷的化学计量废水(物)中的 COD 转化为甲烷的量可以看作是基质和生物量比值( $F/M$ )、温度、总生物量以及废水(物)与微生物接触时间的函数。COD 的降解潜势可以看作是有机污染物浓度、产酸细菌量和产甲烷细菌量的比值以及废水(物)温度的函数。因此,对于给定  $F/M$  值的废水, COD 转化为甲烷的化学计量与上述 14 项因素是直接相关的。

(2) COD 转化为甲烷所需要的时间结构简单的一些有机污染物,如简单糖、有机酸和醇类可以在几分钟内被代谢。随着分子大小和结构复杂性的增加,生物降解速率一般要降低。例如,单环、稠双环和三环的有机物降解速率就大为降低。因此,水力停留时间(HRT)和污泥停留时间(SRT)对于处理复杂的慢速降解有机物的工艺设计来说是决定因素。对于容易降解的有机物,由于基质可以快速被去除,所以 SRT 是控制设计参数。这是可处理性研究必须考虑的。

(3) 出水水质的要求如果厌氧处理是作为好氧工艺的预处理工艺,则设计和运行比二级处理所要达到的标准低。如果只考虑二级处理,则进行可处理性研究还必须分析可能发生的短流问题,例如可采用分级处理等,同时,采用调节池是很必要的。

(4) 硫化物生成势在有硫酸盐存在的情况下,一部分 COD 的电子流会转向生成硫化氢,这是厌氧处理工艺运行中经常出现的问题。一般来说,30~60d 的运行时间不太容易确知反应器的运行特性。硫酸盐还原菌的倍增时间长,合成产率低,需要相当长的时间才能在厌氧活性污泥中显现出硫酸盐还原菌的活性。同样,要追踪到硫化氢前体的相对含量也需要一个相当长的时间。硫化氢在处理过程中不能被还原。

(5) 碱度生成势补充碱度需要增加工艺运行的支出费用,所以厌氧可处理性研究的一个关键参数是确定进水和出水间碳酸氢盐碱度的高低。代谢中释放阳离子的有机物如蛋白质、肥皂会产生碱度,还原硫酸盐和亚硫酸盐也产生碱度。

### 2.1.3 厌氧可处理性研究注意要点

(1) 驯化微生物测定 BMP 和 BOD 的关键是要用已经驯化的微生物来接种。通过累积甲烷产气量曲线的形状可以获得接种微生物驯化程度的特征。如果产气滞后,或者累积产气曲线要有一个很长的阶段才能达到曲线的渐近线(最大值),或者达到一个假性渐近线,这都表明接种微生物未被驯化。如果再重复加入同样的水样,可能产气滞后时间变短,也可能不再有产气滞后期,这都是微生物被驯化的特征。

经验表明,除非加入了经过适当驯化的接种污泥,否则会使废水(物)BMP 测定结果明显偏低。例如,如果微生物从未接触过酚,其驯化大概需要 30d。对于氰化物所需要的驯化时间会更长些。

(2) 碱度和挥发酸积累测定 BMP 时,溶液必须保持中性 pH 值。对于 BOD 测定一般要有 300mg/L 碱度是适宜的,因为测定时水样要被稀释,氧的消耗量只有 2~7mg/L。但是测定 BMP 时,要有 2000~4000mg/L 的碱度,才能保证在代谢产生  $H_2CO_3$  和其他挥发酸情况下 pH 值为中性。

测定 BMP 时,一开始挥发酸浓度可能大于 1000mg/L。血清瓶中水样必须用含 20%~50% 的  $CO_2$  和惰性气体(氮气或甲烷)的混合气体吹洗。还要补充足够的氮、磷和微量金属元素。

(3) 分析难降解 COD 与好氧处理过程一样,厌氧生物降解并不能适用于废水(物)

中的所有有机组分，例如，甲基叔丁基醚、叔丁醇和“软性”烷基苯磺酸盐洗涤剂和苯等。对这些有机物进行 BMP 测定主要是评定在厌氧处理之后还残留多少 COD，并弄清楚能被厌氧处理转化的可生物降解部分是多少。

(4) 防止出水中挥发酸浓度过高厌氧处理出水中挥发酸浓度一般小于 100 300mg/L。在某些环境条件下，如存在毒性或缺乏微量金属都会使出水中挥发酸浓度长期居高不下。这会使 COD 去除率降低和出水中 COD 浓度增加。挥发酸可以很容易被产甲烷菌降解，这一点是没有问题的。问题在于在可处理性研究中必须弄清楚是什么不利的环境条件阻碍正常的 VFA 转化为甲烷。如果挥发酸浓度居高不下，在可处理性研究中要通过充分的试验确定是由于缺乏微量金属还是由于存在毒性，或者需要采用分级处理。

最应注意的是短期可处理性研究中出现的一些假象。例如，开始接种污泥中可能有过量的营养，可能需要运行几天或几周时间才能显现缺少氮、磷和微量金属营养的迹象。此外，在可处理性研究之前就要补充过量的可能必要的无机营养，否则，在可处理性研究开始之后不可能再确定需要的无机营养类型和数量。

同样，在短期的试验阶段也难以确定所试验废水（物）生物净合成量。对于 UASB、流化床或填充床滤池在小于 2~3 个月的时间里也难以精确取样测定生物总量的增加。

## ► 2.2 有机物厌氧生物降解

### 2.2.1 微生物降解转化有机物的巨大潜力

微生物虽然个体微小，但是其表面积巨大，功能多样，具有降解转化有机物的巨大潜力。简述如下。

(1) 微生物个体微小，比表面积大，代谢速率快微生物个体微小，以细菌为例，3000 个杆状细菌头尾衔接的全长仅为一粒 籼米的长度，而 60~80 个杆菌“肩并肩”排列的总宽度只相当于人 1 根头发的直径， $2 \times 10^{12}$  个细菌平均质量仅为 1g。物体的体积越小，其比表面积（单位体积的表面积）就越大。显然，微生物的比表面积，比其他任何生物都大。将大肠杆菌与人体相比，前者的比表面积约为后者的 30 万倍。如此巨大的表面积与环境接触，成为巨大的营养物质吸收面、代谢废物排泄面和环境信息接受面，故而使微生物具有惊人的代谢活性。有人估计过，一些好氧细菌的呼吸强度按质量比例计算要比人类高几百倍。

(2) 微生物种类繁多，分布广泛，代谢类型多样微生物的营养类型、理化特性和生态习性多种多样，凡在有生物的各种环境，包括其他生物无法生存的极端环境中，都有微生物存在，它们的代谢活动对形形色色污染物的降解转化起着至关重要的作用。

(3) 微生物降解酶微生物能合成各种降解酶，酶具有专一性，又有诱导性，对环境中的污染物，微生物通过其灵活的代谢调控机制而降解转化污染物。

(4) 微生物繁殖快，易变异，适应性强大的比表面积，使微生物对生存的变化具有极大的敏感性；又由于微生物繁殖快，数量多，可在短时间内产生大量变异的后代，而对进入环境的“陌生”污染物，微生物可通过突变，改变原来的代谢类型而适应新的环境，降解污染物。

(5) 微生物体内还有另一套调控系统——质粒质粒（plasmid）是菌体内一种小环状的 DNA 分子，是染色体以外的遗传物质。降解性质粒编码生物降解过程中的一些关键

酶类、抗药性质粒能使宿主细胞对抗生素和有毒化学品如农药和重金属等具有选择优势的基因，因而具有极其重要的意义。质粒能转移，获得质粒的细胞同时获得质粒所具有性状。

现代微生物学研究发现，许多有毒化合物，尤其是复杂芳烃类化合物的生物降解，往往有降解性质粒参与。将各供体细胞的不同降解质粒转移到同一个受体细胞中，可构建多质粒菌株。这方面的一个经典例子是：美国生物学家 Chakrabarty 采用连续融合法，将解芳烃、解砷烃和解多环芳烃的质粒，分别移植到一解脂烃的细菌细胞中，构成的新菌株只需几个小时就能降解原油中 60% 的烃，而天然菌株需要 1 年以上的时间。中国科学院武汉病毒所分离到一株能以农药六六六为惟一碳源和能源的菌株，经检测发现，该菌携带一个质粒。凡丧失了质粒的菌株，对六六六的降解能力随即消失；将该质粒转移到大肠杆菌细胞内，后者便获得降解六六六的能力。金属的微生物转化，也是由质粒控制的，主要与质粒所携带的抗性因子有关。

(6) 共代谢作用微生物在可用作碳源和能源的基质上生长时，会伴随着一种非生长基质的不完全转化。这种现象最早是由 Foster 报道的，他在 1951 年在洛桑试验站未发表的文章中，把微生物对氯代苯甲酸的降解，归因于一种能靠苯酸酯生长的土壤棒状杆菌 (*Corynebacterium*) 细胞在 3-氯苯甲酸或 4-氯苯甲酸存在下摄取了氧。当时对这一事实的道理并不清楚，后来他把这种现象首次定义为共氧化作用或共代谢作用 (co-metabolism)。Foster 还观察了靠石蜡烃生长的诺卡菌在含有芳香烃的培养液中对芳香烃的有限氧化作用，这种菌靠十六烷作为惟一碳源时能长得很好，但却不一定能利用甲基萘或莱 (1, 3, 5-三甲基苯的俗名)。把甲基萘或莱加进含十六烷培养液中，氧化作用就使这两种芳香族化合物分别生成羧酸、萘酸和对异苯丙酸。现今对微生物共代谢的一般定义是：只有在初级能源物质存在时才能进行的有机化合物的生物降解过程。共代谢不仅包括微生物在正常生长代谢过程中对非生长基质的共同氧化 (或其他反应)，而且也描述了休止细胞 (resting cells) 对不可利用基质的代谢。

共代谢微生物不能从非生长基质的转化作用中获得能量、碳或其他任何营养。微生物在利用生长基质 A 时，非生长基质 B 伴随着发生氧化或其他反应，是由于 B 与 A 具有类似的化学结构，而微生物降解生长基质 A 的初始酶  $E_1$  的专一性不高，在将 A 降解为 C 的同时，将 B 转化为 D。但接着攻击降解产物的酶  $E_2$ ，则具有较高专一性，不会把 D 当作 C 继续转化。所以在纯培养情况下，共代谢只是一种截止式转化 (dead-end transformation)，局部转化的产物会聚集起来。在混合培养和自然环境条件下，这种转化可以为其他微生物所进行的共代谢或其他生物降解铺平道路，共代谢产物可以继续降解。许多微生物都有共代谢能力，因此，如若微生物不能依靠某种有机污染物生长。并不一定意味着这种污染物抗微生物攻击。因为在有合适的底物和环境条件时，该污染物也可通过共代谢作用而降解。一种酶或微生物的共代谢产物，也可以成为另一种酶或微生物的共代谢底物。

研究表明，微生物的共代谢作用对于难降解污染物的彻底分解起着重要的作用。例如，甲烷氧化菌产生的单加氧酶是一种非特异性酶，可以通过共代谢降解多种污染物，包括对人体健康有严重威胁的三氯乙烯 (TCE) 和多氯联苯 (PCBs) 等。

给微生物生态系统添加可支持微生物生长的、化学结构与污染物类似的物质，可富集共代谢微生物，这种过程称为“同类物富集 (analog enrichment)”。共代谢作用以及利用