

环境工程治理技术丛书

低浓度污水厌氧- 水解处理工艺

国家环境保护局科技标准司主持
环境工程科技协调委员会

中国环境科学出版社



环境工程治理技术丛书

低浓度污水厌氧-水解 处 理 工 艺

国家环境保护局 科技标准司 主持
环境工程科技协调委员会

王凯军 编
郑元景 沈光范 审

中国环境科学出版社

1991

内 容 简 介

低浓度污水厌氧处理技术的研究,是近年来污水处理领域的热点。本书详细地介绍了国内外研究者采用不同型式厌氧反应器(厌氧接触工艺,厌氧滤池、上流式厌氧污泥床、厌氧流化床以及厌氧接触膜膨胀床)所取得的最新研究成果。重点介绍了水解-好氧生物处理技术这一最新进展。

本书对各种技术从实验室研究、中间实验开始,直至生产性实验结果均作了介绍,为读者提供了这一领域大量资料的综合来源,可供从事废水处理的科研、设计、教学和运行管理方面的人员参考。

环境工程治理技术丛书 低浓度污水厌氧-水解处理工艺

国家环境保护局 科技标准司 主持
环境工程科技协调委员会

王凯军 编

郑元景 沈光范 审

责任编辑 高速进

中国环境科学出版社出版

北京崇文区北岗子街8号

三河县艺苑印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

1991年3月第一版 开本 787×1092 1/32

1991年3月第一次印刷 印张 4 1/4 插页 1

印数 1—2 900 字数 95千字

ISBN 7-80010-692-6/X·379

定价: 2.60元

序

解决我国的环境问题，一靠政策，二靠管理，三靠科学技术。在政策上，我国已把环境保护列为一项基本国策并制定了一系列方针政策；在管理上，我们不断总结经验，加强制度建设，强化监督管理，正在建立环境保护工作的新秩序；在科学技术上，关键是要抓好两头，一头是集中财力物力和人力，围绕解决经济建设和社会发展中迫切需要解决的环境问题的关键性技术课题，认真开展科研攻关；另一头是大力开发和普遍推广效益好、见效快、适用性强的治理污染的技术成果，提高广大环境保护工作人员的业务水平和技术素质，帮助广大企业包括乡镇企业加速实现环境保护的技术进步。这是密切科技和生产的结合，迅速提高我国防治污染水平的重要途径。

十多年来，我国各科研院所、高等院校、设计单位以及工业地区的专业部门在污染防治、环境工程技术等方面取得了许多科技成果，积累了不少经验。把这些科技成果和经验加以归纳总结使多数人掌握，可以避免环保科研工作在一水平上的重复劳动。把国内科技研究同引进先进技术有效地结合起来，有利于加速对引进技术的消化、吸收和创新。

鉴于科学技术的重要性和交流总结经验的迫切性，国家环境保护局科技司和国家环境保护局环境工程协调委员会组织编写了这套《环境工程治理技术丛书》，在编写的体例上既不同于一般的科研成果报告，又不同于一般的教科书，而是突出应用性和经验的总结。

本套丛书的编辑委员会承担了组织选题、编写和审稿

等具体工作。丛书的内容有单元技术和设备、处理工艺技术和环境污染区域综合防治；废水、废气、废渣的处理与利用和环境影响评价等。在治理技术的编写中，一般包括国内外的技术进展，工艺技术的特点和原理，设计计算和实例介绍与分析，其中有的还包括作者对一些技术问题的讨论和看法。承担编写和审稿的同志大都是多年在第一线上从事这方面工作的专家。本套丛书共几十本，计划分批付印出版。

虽然我们力图使本套丛书深入浅出，图文并茂，具有科学性、实用性和先进性，但由于篇幅所限，每个问题的论述不可能面面俱到，加之从编写到编辑出版时间较紧，而科学技术本身又不断发展，所以丛书中的缺点和错误在所难免，希望得到读者批评指正。

张崇华

1990年4月

目 录

概 述	(1)
第一章 厌氧处理低浓度污水的发展历史	(3)
第二章 厌氧处理污水技术的发展	(7)
第三章 厌氧滤池	(14)
第一节 人工合成生活污水实验	(14)
第二节 生活污水的厌氧滤池处理	(17)
第三节 Anflow 厌氧滤池工艺	(21)
第四节 厌氧-好氧联合处理工艺	(24)
第五节 温度与停留时间对厌氧滤池的影响	(29)
第六节 水量冲击负荷对于厌氧滤池的影响	(34)
第四章 上流式厌氧污泥床 (UASB) 工艺	(36)
第一节 处理城市污水的可行性研究	(36)
第二节 UASB 中型实验 (6m ³) 结果	(38)
第三节 生产性实验	(43)
第四节 出水水质的进一步改善方法	(48)
第五章 厌氧生物膜膨胀床与流化床	(50)
第一节 处理人工合成污水	(51)
第二节 处理生活污水	(54)
第三节 厌氧接触膜工艺动力学	(57)
第四节 厌氧接触膜反应器的特性	(61)
第五节 好氧后处理	(64)
第六节 厌氧生物流化床	(64)
第六章 水解 (酸化)-好氧生物处理工艺	(67)
第一节 低浓度污水特点的理论分析	(67)

第二节	厌氧污水处理发展面临的问题.....	(78)
第三节	厌氧-好氧工艺的小试研究	(80)
第四节	水解-好氧工艺生产性实验	(82)
第五节	水解池的反应特点.....	(86)
第六节	好氧后处理的研究.....	(103)
第七节	水解-好氧生物处理工艺机理	(106)
第八节	水解-好氧串联工艺与传统处理工艺 技术经济比较.....	(117)
第九节	结论.....	(118)
第七章	水解-好氧生物处理工艺应用实例	(121)
第一节	难降解的工业废水.....	(121)
第二节	城市污水处理厂的设计.....	(122)

概 述

厌氧处理工艺与传统的好氧工艺相比，具有很大的优越性。在今天极为重要的一点是厌氧处理过程能够产生一种有用的能源物质——沼气。而好氧处理则需消耗大量的能源。另外由于厌氧处理中污泥产生量大为减少，从而大幅度降低了污泥处置费用。近一二十年来厌氧生物处理在高、中浓度污水处理技术上有了迅速的发展。但是一般认为厌氧处理不适合处理低浓度和温度低于 20°C 的废水。什么叫低浓度污水？从目前生物处理技术的发展水平来看 $\text{COD} < 1000\text{mg/L}$ ($\text{BOD} < 500\text{mg/L}$) 的有机污水，都可以认为是低浓度污水，特别是城市污水，生活污水和各种行业的工业废水，本文涉及的低浓度污水主要是指城市污水。

Cille (1969 年) 曾认为，仅仅当污水浓度大于 4000mg/L COD 时，厌氧处理才比好氧处理更加经济，在能源价格不断上涨的 70 年代，污水厌氧处理浓度的低限也在不断降低。Anderson 通过分析计算得出在 1981 年污水厌氧处理的低限浓度为 4000mg/L ，与 Cille 的结论是一致的，而在 1982 年这个低限值为 2000mg/L COD 时，则厌氧处理就比好氧处理更加经济。厌氧处理一直不能应用于低浓度污水其原因主要是厌氧菌生长缓慢，世代期长，对环境要求高。另外从技术上讲，传统的厌氧处理工艺也限制了厌氧处理工艺的发展。Anderson 在 1983 年曾经提出如果能源费用继续上升，厌氧处理技术进一步发展，则厌氧装置处理的废水 COD

浓度还可以下降。如果降至 1000mg/L COD 以下，他认为厌氧处理可能用于生活污水。本文提出低浓度污水的界限值也就是依据于此。

进入 80 年代以来，各国的研究者都在努力研究和开发用于处理低浓度污水的厌氧处理工艺，各国的研究都显示了厌氧处理应用于城市污水的良好前景，北京环保所在 1985 年成功地应用上流式厌氧污泥床处理城市污水，处理规模为 $1500\text{m}^3/\text{d}$ ，目前已将该成果应用于密云县、怀柔县城两个 $15000\text{m}^3/\text{d}$ ，大兴县 $40000\text{m}^3/\text{d}$ 的城市污水处理上，预计在 1989 年将投入运转。而巴西的圣保罗同样也取得了很大进展，在圣保罗地区设计了能力为 $24000\text{m}^3/\text{d}$ 和 $14500\text{m}^3/\text{d}$ 的城市污水示范性处理厂，从而可以看出厌氧处理城市污水正在逐步地走向生产，在今后的几年内将有突破性的进展。

第一章 厌氧处理低浓度 污水的发展历史

企图采用厌氧方式处理低浓度污水，特别是城市污水并不是一个新的想法，追溯其起源，甚至要比好氧处理的历史更长。第一篇有记载的报道是在1881年12月法国《宇宙》杂志上描述了从1860年开始由法国的 Mouras 将简易沉淀池加以改进而来的“Mouras 自动净化器”的密闭式反应器。这一时期由于工业尚不甚发展，污水的污染物主要是生活污水中粪便所形成的悬浮固体，这些悬浮物在反应器内被液化分解。

Scofi-Moncrieff 在1890年设计了第一个初步的厌氧滤池 (Anaerobic filter)。他在英国建造了一个底部是空的，上边铺了一层石块床的消化器。污水从10个进水口进入池的底部，然后向上通过石块床，石块的作用是阻挡废液中固体通过。这可能是第一个上流式污泥床与厌氧滤床相结合处理城市污水的装置。不幸的是，系统对BOD的去除能力不如系统对于悬浮物的去除率那么高。这种装置长期以来没有受到应有的重视，直到50年代由于现代工业的发展，才重新得到应用和继续发展。

对于早期的污水处理最有影响的发展，无疑是由英国 Cameron 在1895年获得专利权的腐化池 Septic tank (见图1-1)。其反应器的主要结构要比 Mouras 的自动净化器还要简单，因此在欧洲的污水处理中迅速得到应用。这种腐化

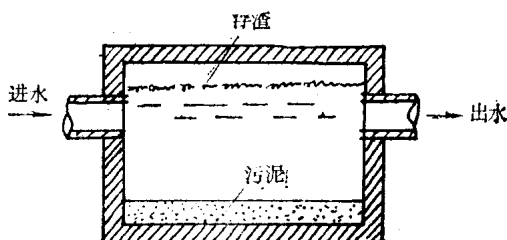


图 1-1 腐化池

池是一种简单的沉淀池，沉淀下来的污泥存放其中，直至可腐败物质部分或全部消化。一般消化率可达到 25~30%，这样一种简单的连续进水的污泥池在污泥的沉淀和腐化作用方面都存在问题。污泥的厌氧状态往往影响到上部的出水，使污水散发出臭气。同时产生的气体将污泥上浮至上部，使部分污泥与污水一起排出，剩余部分则在上部形成厚而坚实的浮渣层，这一浮渣层不能被消化，因而很不卫生。尽管有这些缺点，由于其构造简单，适用于小型污水处理厂。直到现在还为世界各国广泛采用。在气候炎热地区，腐化池还作为氧化塘的预处理构筑物，效果十分良好。这种腐化池是在厌氧处理方面的一个重要发展。

Cameron 重视沼气的利用，两年后将腐化池产生的甲烷用于处理厂的加热和照明，据报道 1897 年印度在孟买用这种装置产生的沼气来驱动煤气发电机发电。虽然腐化池处理城市污水确实可以减少污染问题，但不能完全消除污染。从腐化池的出水经常是黑色并带有臭味，未被消化的固体物质还会堵塞后续的处理构筑物。1899 年美国的 Clark 提出应该从污水中迅速去除污泥，使污水保持新鲜，并将分离出的

污泥在隔绝空气的条件下进行消化的想法。根据这一想法英国的 Travis 在 1904 年首先在英国汉普顿建成了双层沉淀池 (two story tank) 这种特拉维斯双层沉淀池用薄壁结构分隔反应器成上部沉淀室与下部消化室 (图 1-2)。废水在流动过程中, 沉淀了一部分污泥, 在池的中部消化。其在去除的固体物的消化率方面显著优于腐化池, 污泥消化率为 72%。

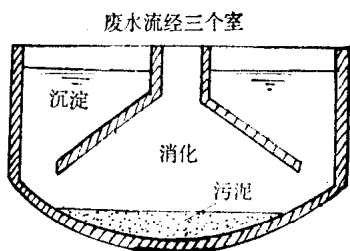


图 1-2 特拉维斯池

1900~1927 年间, 各种厌氧工艺设计的指导思想主要是先沉淀, 后发酵这个原则。这一类型装置存在的问题是沉淀和消化过程不能分开。由于不能分开, 所设计的装置很高, 所以在此后有把两个过程分开的趋势, 这样就导致了出现传统的消化池 (图 1-3)。由于在此过程中, 所谓的厌氧处理仅仅是针对从污水中分离出的固体物进行厌氧消化, 而污水本身的有机物 (BOD) 并没有去除和受到厌氧处理。污泥

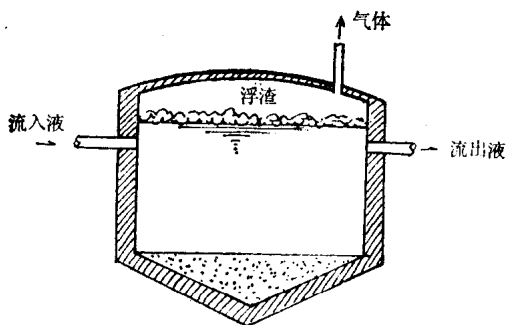


图 1-3 传统消化器

消化池的进一步发展，更加剧这一过程。这样就使厌氧工艺用于城市污水与其说是处理污水，不如说是用于污泥处理更为确切，从而使低浓度污水的厌氧处理的发展进入了绝境，导致了几十年的停滞不前。

第二章 厌氧处理污水技术的发展

随着工业社会的发展，人口集中于城市，生活污水和工业废水混合一起，引入了大量的人工合成有机物和有毒有害的化学物质，形成了现代的城市污水流入河道污染环境，使得仅仅处理固体物的厌氧处理方式远远不能满足要求。与厌氧处理工艺几乎同时起步的好氧处理工艺则可满足这一要求，因此在1900~1970年这一时期得到迅速的发展。相继出现了好氧滴滤池（1900年），好氧活性污泥工艺（1913年）及其各种变形。好氧生物处理工艺的成功，促进了厌氧生物处理技术的发展。

从好氧处理工艺，例如活性污泥法的经验得知，有机物的迅速降解依赖于高的细菌量。由于生物处理工艺的实质，是微生物的生命活动，在其生长周期内的新陈代谢将有机污染物分解代谢以维持其生命活动，因此，保持系统内有足够量的微生物始终是生物处理技术的核心。在最近二三十年中人们对于各种厌氧处理技术的探讨也始终是围绕着增加反应器中的生物量（污泥浓度）和减少出水挟带生物量这两方面进行的，从实质上讲是围绕着提高污泥龄（SRT）而进行的。

Mckiney 和 Eckenfelder 等人在好氧及厌氧污水处理数学模型方面进行了大量的研究，从理论上阐明了污泥龄做为生物处理设计与运行参数的重要性，特别是对于厌氧处理过程很多学者不断认识到保持反应器内大量的微生物和尽可

能长的污泥龄是提高反应效率成败的关键。污泥龄的定义式如下：

$$\text{污泥龄} = \frac{\text{反应器中的活细菌量}}{\text{每天从系统中流失的活细菌量}} \dots\dots (1)$$

下面用污泥龄的概念分析传统消化工艺（见图2-1）。污水或者污泥定期或连续加入消化池，经消化后污泥和污水分别由消化池底部和顶部排出。在搅拌时，整个池子处于完全混合状态，是一个完全混合(CSTR)反应器。这类反应器的特点就是在一个池子内实现了厌氧反应和固液分离。由于是完全混合状态，其液体停留时间（HRT）与固体停留时间（SRT）有下列关系：

$$\text{HRT} = \frac{V}{Q} = \frac{VX}{QX} = \text{SRT}$$

式中 X——污泥浓度 (g/L)；
Q——为进水量 (m³/d)；
V——反应器体积 (m³)。

由于 VX 是反应器内微生物（污泥）总量，而 QX 为出水挟带的生物量，从而以 SRT 的定义式可知两者之比即为污泥龄。在此反应器中，液体停留时间与固体停留时间在消化池中完全相同。从 SRT 的物理概念可知，SRT 代表了活细菌在反应器中的平均停留时间，也就是它能够充分增殖的时间。为了满足各种微生物增殖的要求特别是甲烷菌生长的要求，SRT 必须有一个足够的数值。如果此值小于某种微生物的世代时间，则该种微生物就不能在系统中充分增殖起来，也就无法完成其特定功能。以甲烷菌为例，一般甲烷菌的世代时间要长达十几天到几十天。要使其充分生长必须满足其起码的世代期的要求，这也就是以往消化池停留时间

须在 20~30 天以上的原因，这样就严重限制了厌氧技术的应用。

Schroepster (1955 年) 首先认识到在设备内保持大量微生物的重要性，把好氧活性污泥法引入厌氧处理工艺，处理浓度相当低的屠宰废水。在厌氧消化池之外加上了一个沉淀池用来收集污泥，使其回流到消化池（见图 2-1），增加消化池中的污泥浓度，其结果缩短了反应时间，这种工艺称为厌氧接触工艺。这个处理系统的效率很好，它的应用标志着在一个广泛范围内应用和开发厌氧处理低浓度污水的一个新开端。

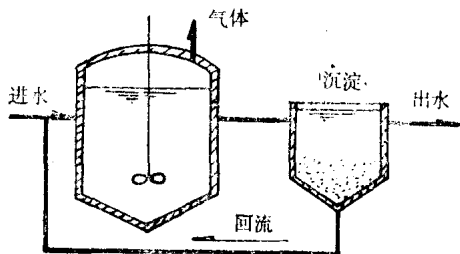


图 2-1 厌氧接触工艺

这一时期由 Coulter, Soneda 和 Effinga 所进行的研究是当时最全面和最成功的厌氧处理污水的研究，他们在 1956 年以处理城市污水为目的，试图研制一种适用于小居民区的简单，而处理费用低的工艺。其小试装置见图 2-2。

在一个类似上流污泥床的反应器，其后跟着一个独立的以石块为填料的厌氧滤池。他们将上述工艺命名为“厌氧接触工艺”。小试设备污泥接触室的容积是 9L，停留时间 1.65 天，滤池的容积是 700ml，空隙率大约为 0.4，理论停留时

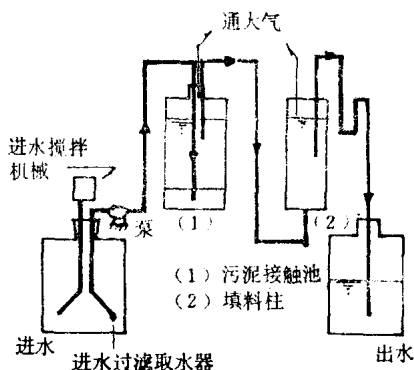


图 2-2 厌氧处理城市污水小试装置

间为2.5h, 系统采用1L消化污泥接种, 在室温条件下和4℃条件下运行数据表明该系统运行简便, 出水洁净, 几乎没有臭味, 在进水平均BOD₅为177mg/L出水BOD₅为10~35mg/L, 去除率80~90%, 平均82%。在4℃时出水BOD₅上升为40~90mg/L, 去除率为55~80%, 平均67%。出水悬浮物在两种温度下在2~20mg/L变化, 平均9mg/L。去除率超过95%。实验中发现在厌氧接触池中, 污泥量显著减少, 而在厌氧滤池中发生一些物质积累, 但并没有引起堵塞, 也没有水头损失增加的情况。

后来 Coulter 等人试图将该装置放大, 图2-3是Coulter的中试装置, 其第一级是一4.7m³锥底厌氧污泥接触池, 其后有一个1.2m高2.6m³的厌氧滤池作为第二级。整个系统的理论停留时间为24h。厌氧池的起动没有接种, 开始阶段BOD₅的去除率为49%, 7周以后达到65%, 在运行开始第3周, SS去除率就达到90%, 出水悬浮物从运行开始