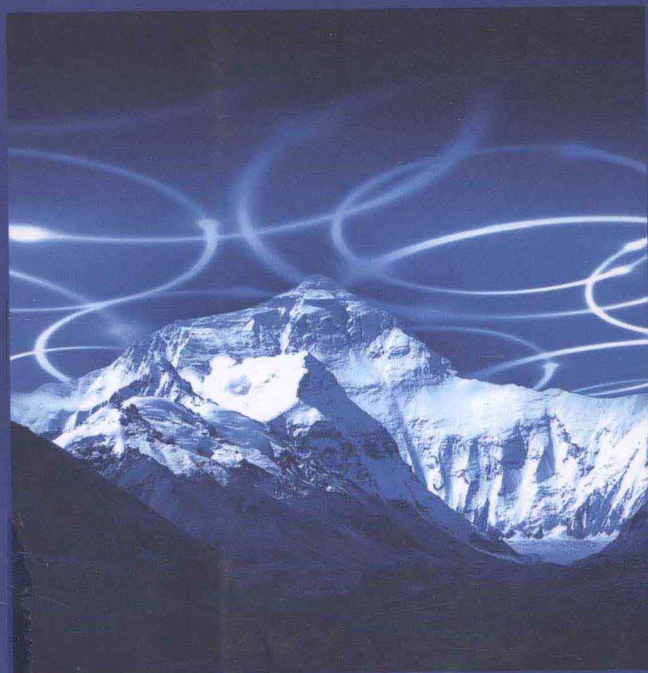




博士文库

工业厌氧颗粒污泥自固定化过程中的流体力学

刘永红 著



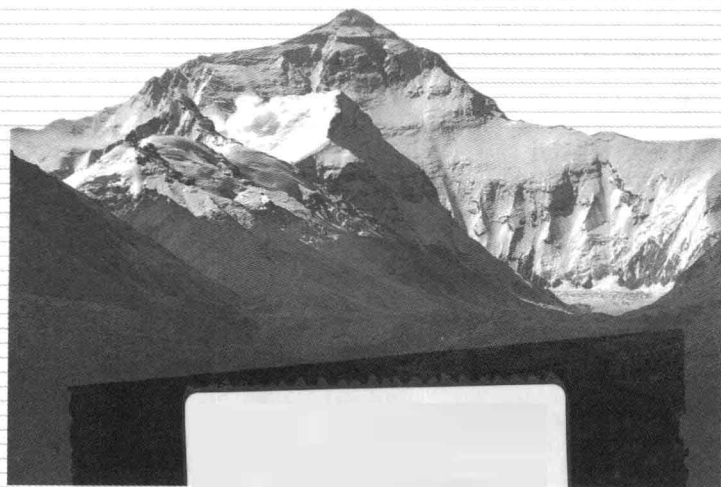
西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



博士文库

工业厌氧颗粒污泥自固定化过程中的流体力学

刘永红 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书运用多学科交叉优势针对工业厌氧颗粒污泥自固定化过程中的流体力学问题展开了较为深入地研究。其内容包括高效厌氧反应器技术简介、厌氧颗粒污泥反应器流态特征、厌氧颗粒污泥沉降与膨胀性能研究、生产实践中颗粒污泥品质评价参数研究、颗粒污泥性能参数与厌氧反应器运行主要控制参数的测定等。

本书适用于从事废水厌氧生物处理和高效厌氧反应器开发的师生和相关技术研究人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

工业厌氧颗粒污泥自固定化过程中的流体力学/刘永红著.
—西安:西安交通大学出版社,2011.7
ISBN 978-7-5605-3972-0

I. ①工… II. ①刘… III. ①厌氧处理;污泥处理-流体力学 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 143464 号

书 名	工业厌氧颗粒污泥自固定化过程中的流体力学
著 者	刘永红
责任编辑	毛 帆

出版发行	西安交通大学出版社 (西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址	http://www.xjtupress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行中心) (029)82668315 82669096(总编办)
传 真	(029)82668280
印 刷	西安明瑞印务有限公司

开 本	787mm×1092mm 1/16	印 张	9.5	字 数	175 千字
版 次	2011 年 7 月第 1 版		2011 年 7 月第 1 次印刷		
书 号	ISBN 978-7-5605-3972-0/X·4				
定 价	25.00 元				

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdly@yahoo_cn

版权所有 侵权必究

序 言

现代厌氧生物技术不仅能够以节能的方式处理废水与固废,而且还能实现污染物的资源化利用和可再生能源的生产,代表着未来废水与固废处理技术发展的一个重要方向,符合低碳经济理念,是实现可持续发展的重要核心技术。

近百年来,厌氧生物技术的发展经历了以厌氧消化池为代表的第一代反应器技术(1896年),以厌氧滤池和升流式厌氧污泥床反应器(20世纪70年代)为代表的第二代和以厌氧颗粒污泥膨胀床反应器、内循环厌氧反应器(20世纪80年代)为代表的第三代反应器技术3个基本阶段。截至2001年,世界上已有2000多个不同类型的高效厌氧反应器(其中UASB和EGSB所占比例高达75%)在饮料、食品、发酵、造纸、制药、化工、酒精、农产加工等高浓度工业废水和有机固体废弃物的处理中得到了广泛应用。厌氧反应器技术的迅速发展,为解决当前环境恶化和污染治理提供了经济有效的技术手段,也成为当前重要的可再生能源生产技术之一。

颗粒污泥及其形成过程中的流体力学是现代高效厌氧反应器研究与开发中的核心问题之一。对于UASB、EGSB和IC等高效厌氧反应器来讲,高品质厌氧颗粒污泥的形成和长期稳定保持分别是反应器能够实现快速启动、高负荷稳定运行的基础。厌氧反应器流体力学特征与反应器适宜水力学操作条件的确定是这类生物反应器优化设计、放大与运行过程中的技术核心。此外,如何评价工业厌氧反应器中颗粒污泥的品质,从而对生产过程进行控制在工程实践中也具有重要意义。

围绕以上问题,刘永红就高效厌氧反应器流体力学特征、厌氧颗粒污泥沉降特性与膨胀性能以及生产实践中厌氧颗粒污泥品质评价体系展开了深入的研究,得出了一系列有价值的观点和重要研究结论。

(1)为强化微生物与废水之间的混合,同时很好地兼顾颗粒污泥结构的稳定性及有效缓解颗粒污泥的流失,稳态操作条件下高效厌氧反应器的膨胀率应控制在25%~30%的范围内。在此操作范围内,反应器具有适度的水力混合特性、较高的有机负荷以及COD去除率。

(2)从理论上和实践上系统地证明了颗粒污泥的沉降过程属于过渡区而非层流区,澄清了国内外此方面的认识误区并提出了一种简洁的颗粒污泥沉降速度计算方法。

(3)运用流态化理论建立了关于厌氧颗粒污泥床膨胀率与反应器水力负荷之间的定量计算公式,为此类反应器的稳定运行与控制提供了相关理论依据。

(4)以与工业厌氧反应器快速启动与稳定运行关系密切且测定方法简便易行、参数之间尽可能相互独立为标准,筛选建立了一组适宜在生产实践中运用的厌氧颗粒污泥品质评价参数并规范了相应测定方法。该参数体系不仅能够较好地鉴定和分析工业厌氧颗粒污泥的品质,而且还可通过颗粒污泥品质参数的分析来确定、调整反应器各种操作参数以指导高效厌氧反应器的运行过程。

本书作者从流体力学角度针对厌氧颗粒污泥所代表的独特的微生物自固定化现象的研究及研究结论,相信必将丰富化学工程、环境学科与生物学科等领域的研究内容,具有重要的科学意义。

刘永红在西安交通大学攻读博士学位期间克服了来自学习与工作中的诸多困难,刻苦学习,潜心钻研,顺利地获得了博士学位。博士毕业以后论文内容又在博士后阶段新的研究领域与方向上做了改进、深化和扩充,顺利出书。作为他的博士生导师,我由衷地感到高兴,故提笔作序。



2011年8月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 高效厌氧生物处理技术	(1)
1.1.1 高效厌氧生物技术的发展	(1)
1.1.2 厌氧生物处理技术的优缺点	(2)
1.2 高效厌氧反应器简介	(3)
1.2.1 厌氧滤池	(5)
1.2.2 厌氧流化床反应器	(6)
1.2.3 上流式厌氧污泥床反应器	(7)
1.2.4 膨胀颗粒污泥床反应器	(10)
1.2.5 内循环反应器	(12)
1.2.6 复合循环悬浮颗粒床反应器	(13)
1.3 现代厌氧处理系统的特点	(16)
1.3.1 厌氧污泥颗粒化技术	(17)
1.3.2 厌氧消化过程中的主要微生物	(18)
1.3.3 厌氧颗粒污泥反应器内反应与传质之间的关系	(19)
1.4 污泥颗粒化理论	(20)
1.4.1 颗粒化过程中核的形成	(20)
1.4.2 颗粒的生长	(22)
1.5 影响厌氧颗粒污泥形成的因素	(22)
1.6 促进厌氧污泥颗粒化的手段	(26)
第 2 章 厌氧颗粒污泥反应器流态特征、研究现状与发展动态分析	(30)
2.1 几种典型厌氧反应器流态研究简介	(30)
2.1.1 厌氧生物反应器的流动状态	(30)
2.1.2 UASB 反应器	(32)
2.1.3 EGSB 反应器	(33)
2.1.4 IC 反应器	(33)
2.2 工业规模厌氧复合循环悬浮颗粒床反应器流动状态研究	(34)
2.2.1 装置与流态研究方法	(34)

2.2.2	实验与数据分析方法	(35)
2.2.3	流态实验研究结果	(35)
2.2.4	反应器流态影响因素分析	(36)
2.3	国内外研究现状及发展动态分析	(39)
2.3.1	厌氧颗粒污泥反应器宏观流态研究	(39)
2.3.2	厌氧颗粒污泥自身水力学研究	(40)
2.3.3	厌氧颗粒污泥自身产气与释放机制研究	(41)
第3章	厌氧颗粒污泥的沉降性能与平均沉降速度	(42)
3.1	研究意义	(42)
3.2	试验装置与方法	(43)
3.2.1	试验装置与污泥来源	(43)
3.2.2	试验操作步骤	(43)
3.2.3	颗粒污泥群平均沉降速度计算	(43)
3.2.4	颗粒污泥粒径分布的测定	(44)
3.3	基本数学模型的建立	(45)
3.4	模型模拟分析与讨论	(46)
3.5	模型验证	(48)
3.5.1	重量沉降法测定结果	(48)
3.5.2	模型验证	(53)
3.5.3	沉降速度法测定粒径分布方法的讨论	(55)
3.6	厌氧颗粒污泥沉降性能与污泥流失之间的关系	(56)
3.6.1	具有优良沉降性能厌氧颗粒污泥流失的原因分析	(56)
3.6.2	控制颗粒污泥流失的具体方法	(58)
3.7	本章小结	(59)
第4章	厌氧颗粒污泥床反应器膨胀性能研究	(60)
4.1	研究意义	(60)
4.2	数学模型的建立	(61)
4.2.1	载体流态化原理	(61)
4.2.2	厌氧颗粒污泥床反应器膨胀数学模型的建立	(62)
4.3	膨胀过程的模型模拟分析与讨论	(64)
4.4	Biobed [®] EGSB 高负荷运行特性研究	(65)
4.5	模型应用	(68)
4.6	本章小结	(69)

第 5 章 生产实践中厌氧颗粒污泥品质评价参数的研究	(71)
5.1 国内外研究厌氧颗粒污泥特性选用的参数	(71)
5.2 厌氧颗粒污泥评价参数的分析与筛选	(81)
5.2.1 厌氧颗粒污泥特性研究中常见的参数	(81)
5.2.2 厌氧颗粒污泥指标体系参数的筛选	(81)
5.2.3 淘汰的参数及其理由	(83)
5.3 颗粒污泥品质评价参数测定方法的筛选	(85)
5.3.1 沉降性能测定方法的筛选	(85)
5.3.2 粒径分布测定方法的筛选	(86)
5.3.3 机械强度测定方法的筛选	(88)
5.3.4 生物质含量测定方法的筛选	(90)
5.3.5 颗粒污泥活性测定方法的筛选	(90)
5.4 评价体系在工业颗粒污泥特性研究中的应用	(91)
5.4.1 污泥品质与运行状况的联系	(92)
5.4.2 颗粒污泥流失与沉降速度	(92)
5.4.3 实验室与工业反应器污泥颗粒机械强度性质	(92)
5.4.4 厌氧颗粒污泥悬浮床反应器中污泥的活性与泥量	(93)
5.4.5 反应器最佳水力负荷的确定	(94)
5.5 评价体系在生物膜颗粒上的应用	(94)
5.5.1 生物膜颗粒与厌氧、好氧颗粒污泥的类比	(94)
5.5.2 生物膜颗粒的形成过程	(95)
5.5.3 影响生物膜构成及稳定性的因素	(96)
5.5.4 生物膜颗粒的特性参数研究	(97)
5.6 结论	(100)
第 6 章 厌氧颗粒污泥性能参数与厌氧反应器运行主要控制参数的测定	(101)
6.1 颗粒污泥主要理化指标的测试	(101)
6.1.1 粒径分布的筛分重量测量方法	(101)
6.1.2 湿式密度的测量方法	(102)
6.1.3 沉降性能的测量方法	(103)
6.1.4 VSS/TSS、灰分的测量方法	(105)
6.1.5 机械强度测量方法	(105)
6.1.6 金属元素含量的测量方法	(108)

6.1.7	颗粒污泥扫描电镜样品制备方法	(109)
6.2	颗粒污泥主要生化指标测定方法	(109)
6.2.1	比产甲烷活性测量方法	(109)
6.2.2	胞外多聚物含量的测量方法	(113)
6.2.3	辅酶 F ₄₂₀ 含量的测量方法	(116)
6.3	厌氧反应器运行过程中废水主要控制参数测定方法	(118)
6.3.1	挥发性脂肪酸 VFA 的滴定法测定	(118)
6.3.2	碱度的分步滴定法测量	(119)
6.3.3	五日生化需氧量的稀释与接种法测定	(121)
第 7 章	结论与研究展望	(124)
7.1	结论	(124)
7.1.1	流态研究	(124)
7.1.2	厌氧颗粒污泥沉降性能研究	(124)
7.1.3	厌氧颗粒污泥床反应器膨胀性能研究	(125)
7.1.4	生产实践中厌氧颗粒污泥品质评价参数的研究及其实际应用	(125)
7.2	研究展望	(125)
参考文献	(127)
后 记	(141)
致 谢	(143)

第 1 章 绪 论

1.1 高效厌氧生物处理技术

1.1.1 高效厌氧生物技术的发展

厌氧生物处理技术是目前有效、经济、节能地解决高浓度有机废水处理问题的重要途径之一,其实质是利用厌氧微生物的代谢特性,在无需提供外源能量的情况下,将废水中有机物进行还原,同时产生有利用价值的甲烷气体的一种经济而有效的生物处理技术。其中的底物、各类中间产物以及各种微生物间的相互作用,形成一个复杂的微生物生态系统。各类微生物的平稳生长、物质和能量高效、顺畅的流动是维持厌氧过程稳定的必要条件。

如何培养和协调相关各类微生物的平衡生长,最大程度地发挥其中的微生物代谢活性,并拓宽适用范围,是厌氧生物处理技术开发和发展的基本思想和工作目标。

人们对厌氧消化的微生物学和生物化学的认识,经历了一个由浮浅到深入逐渐完善的过程。20 世纪 30 年代,厌氧消化被概括地划分为产酸阶段和产甲烷阶段,把微生物菌群分为产酸菌和产甲烷菌两类,产酸菌参与酸化反应,将复杂的有机物降解为有机酸、醇类、 CO_2 和 H_2 等,然后产甲烷菌利用所产生的有机酸等生成甲烷,这就是厌氧消化的两阶段理论^[1,2]。但是,两阶段理论没有全面的反映厌氧消化过程的本质。1979 年 Bryant 根据微生物的不同生理类群提出的三阶段理论是当前较为公认的理论模式^[3]。该理论认为产甲烷菌不能利用除了乙酸、 H_2/CO_2 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、 H_2/CO_2 等后才能被产甲烷菌利用。三阶段理论包括如下内容。

第一阶段为水解发酵阶段。在该阶段,复杂的有机物在厌氧菌胞外酶的作用下,首先被分解成简单的有机物,如纤维素经水解转化成较简单的糖类;蛋白质转化成较简单的氨基酸;脂类转化成脂肪酸和甘油等。继而这些简单的有机物在产酸菌的作用下经过厌氧发酵和氧化转化成乙酸、丙酸、丁酸等脂肪酸和醇类等。参与这一阶段的水解发酵菌主要是厌氧菌和兼性厌氧菌。

第二阶段为产氢产乙酸阶段。在该阶段,产氢产乙酸菌把除乙酸、甲酸、甲醇以外的第一阶段产生的中间产物,如丙酸、丁酸等脂肪酸和醇类等转化成乙酸和

氢,并有 CO_2 产生。

第三阶段为产甲烷阶段。在该阶段,是通过两组生理上不同的产甲烷菌的作用,一组把氢和二氧化碳转化成甲烷,另一组是对乙酸脱羧产生甲烷。

厌氧生物处理设备发展至今,已有 150 多年的历史。早在 1860 年法国工程师 Louis Mouras 把简易沉淀池改进作为污水污泥处理构筑物使用^[4]。美国学者 McCarty 建议把 1881 年作为人工厌氧处理废水的开始,称 Mouras 是第一个应用厌氧消化处理的创始人。1896 年英国出现了第一座用于处理生活污水的厌氧消化池,所产生的沼气用于照明^[5]。1904 年德国的 Imhoff 将其发展成为 Imhoff 双层沉淀池(即腐化池),这一工艺至今在排水工程中仍占有重要的地位^[6]。

最初的厌氧技术主要应用于生活污水的处理。但是由于废水厌氧处理的不稳定性和厌氧细菌较慢的生长率,那时人们普遍认为废水厌氧处理难取得高负荷,所以在 20 世纪 60 年代以前厌氧技术发展非常缓慢。直到 1969 年 Young 和 McCarty 发展的厌氧滤池(Anaerobic Filter, AF)处理以挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acids, VFA)为底物的废水,AF 容积负荷达到了 $3.4 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,处理效率达到 87%,厌氧技术才取得了突破性的发展^[7]。1974 年 Wageningen 农业大学的 Lettinga 教授等人成功开发了升流式厌氧污泥床反应器(Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)并获得广泛应用。Lettinga 对于颗粒污泥的研究和重视,成为开创新一代厌氧反应器的重要基础,UASB 技术对废水厌氧生物处理具有划时代的意义。

20 世纪 80 年代里,科学工作者发展了一批新的高效厌氧处理工艺。如 1982 年把 UASB 反应器和厌氧滤池结合开发了 UBF(Upflow Blanket Filter)反应器,又称为厌氧复合反应器。1982 年在 UASB 反应器的基础上开发了以处理含高固体的废水反应器 USR(Upflow Solid Reactor),并在 UASB 可形成颗粒污泥的基础上 1981 年成功开发了膨胀颗粒污泥床反应器和 1985 年开发出内循环厌氧反应器^[6,8]。

这些新颖的厌氧处理工艺的不断开发,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的传统观念,表明厌氧处理是高效能的,可适用于不同温度和不同浓度的废水处理。

1.1.2 厌氧生物处理技术的优缺点

厌氧生物处理技术是利用厌氧微生物的代谢特性,在不需要提供外源能量的条件下,以被还原有机物作为受氢体,同时将有有机物转化为无机物(沼气和水)和少量的细胞产物,从而达到废水处理和能源回收的目的。

同传统好氧生物处理技术相比较,其优点表现在:

① 反应过程无需氧的参与,动力消耗仅相当于好氧技术的十分之一,运行费

用大大降低。相比之下,好氧处理每去除 1000 kgCOD 需耗电 500~1000 kWh。

② 厌氧代谢营养需求低,剩余污泥量少,明显节省营养物添加费用。厌氧条件下,细胞增长量仅占总碳量的 5%,而好氧处理污泥产生量比厌氧处理污泥产量多 3~20 倍。因此,厌氧处理可有效避免剩余污泥问题的出现,显著降低了剩余污泥的脱水费用。

③ 产生大量甲烷气体。厌氧处理释放生物热能仅占总能量的 5%,绝大部分能量以沼气形式储存。每去除 1000 kgCOD 产生甲烷的能量为 1.26×10^6 kJ,可以将废水处理与回收利用生物能相结合。

可以看出,厌氧废水处理是一种低成本的废水处理技术,它又是把废水的处理和能源的回收利用相结合的一种技术,对于包括中国在内的发展中国家,高效厌氧反应器的开发及推广应用具有巨大的潜力^[4,5]。而不断发展的高效厌氧反应器不仅具备上述优点,更在如下方面备受青睐:

① 水力停留时间(Hydraulic Retention Time, HRT)短(通常小于 24 小时)。水力停留时间和污泥停留时间(Sludge Retention Time, SRT)的高度分离使反应器内保留大量生物物质,大大地提高了污泥浓度。

② 有机负荷率高(通常大于 $10 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$)。有机负荷是普通好氧工艺的 5~10 倍,适用于高浓度有机废水处理。

与废水的好氧生物处理工艺相比,废水厌氧生物处理工艺也存在着以下明显缺点:

① 厌氧生物处理过程中所涉及到的生化反应过程较为复杂。因为厌氧消化过程是由多种不同性质、不同功能的厌氧微生物协同工作的一个连续的生化过程,不同种群间细菌的相互配合或平衡较难控制,因此在运行厌氧反应器的过程中需要很高的技术要求。

② 厌氧微生物特别是其中的产甲烷细菌对温度、pH 等环境因素非常敏感,也使得厌氧反应器的运行和应用受到很多限制。

③ 虽然厌氧生物处理工艺在处理高浓度的工业废水时常常可以达到很高的处理效率,但其出水水质仍通常较差,一般需要利用好氧工艺进行进一步处理。

④ 厌氧生物处理的气味较大。

⑤ 对氨氮的去除效果不好,一般认为在厌氧条件下氨氮不会降低,而且还可能由于原废水中含有的有机氮在厌氧条件下的转化导致氨氮浓度的上升。

1.2 高效厌氧反应器简介

20 世纪 70 年代初,世界范围内能源危机的加剧以及全球环境问题的日益突出,以及学科之间的相互交叉促进了人们对厌氧生物处理技术研究的不断深入。

工业厌氧颗粒污泥自固定化过程中的流体力学

废水的厌氧生物处理的理论与应用技术出现了突破性的进展,厌氧反应器成为其中发展最快的领域之一。根据废水生物处理反应器不同的历史发展阶段,废水厌氧生物处理反应器分为第一代、第二代和第三代厌氧反应器。

第一代厌氧反应器是以厌氧消化池(Anaerobic Digestion Tank)为代表的早期厌氧反应器。由于其水力停留时间和污泥停留时间相同,设备庞大,能耗高,此类反应器处理效率很低。

微生物学、生物化学等学科的快速发展和人们对厌氧生物处理技术的研究不断深入,极大地推动了以微生物固定化和提高污泥与污水混合效率为基础的一系列高速厌氧反应器(High-Rate Anaerobic Reactor)的研究和发展。高速厌氧处理系统应该满足能够保持大量的活性厌氧污泥和取得进水和污泥之间的充分接触两个基本条件。

从满足第一个条件的思路出发,人们采用生物膜固定化技术和培养易沉淀厌氧污泥(颗粒污泥)的方式开发出了以UASB、厌氧流化床反应器(Anaerobic Fluidized Bed, AFB)等为代表的第二代厌氧反应器,此类反应器实现了污泥停留时间与水力停留时间的有效分离,能够持有大量的高活性颗粒污泥,微生物均以颗粒污泥固定化的方式存在于反应器中,反应器处理负荷得到了很大地提高。但这类反应器不同程度地存在沟流和死角问题,不能很好地满足高速率厌氧处理系统的第二个要求。

为了进一步使高效厌氧反应器满足第二个要求,相继出现了以EGSB、IC反应器、厌氧序批式间歇反应器(Anaerobic Sequencing Batch Reactor, ASBR)等为代表的第三代厌氧反应器。第三代反应器及其工艺采用合理的结构设计保证了进水的均匀分布、利用反应器的大高径比设计和出水回流等方法,不仅对污泥停留时间和水力停留时间进行有效分离,而且很好地改善了废水与污泥的接触^[9]。

据统计截至2001年^[10],世界上已有2000多个不同类型的高效厌氧反应器在生产中得到应用,其中UASB和EGSB类型的反应器所占比例高达75%,成为主流高效厌氧反应器。厌氧技术迅速发展,为解决世界范围内的环境恶化和污染治理提供了经济有效的手段。

从厌氧反应器的发展历程可以看出,如何使反应器内保持有较高的污泥浓度,充分延长污泥在反应器中的停留时间,增强反应器内污泥和废水之间的接触,保持良好的传质,最大限度的利用反应器内的厌氧颗粒污泥是新一代高效厌氧反应器发展的趋势。在土地和能源越来越紧张的今天,研制开发高负荷的、塔形的生物反应器无疑具有很大的发展潜力。表1-1所示为几种典型的第三代新型高效厌氧反应器的对比。

表 1-1 第三代新型高效厌氧反应器的特点

	EGSB	IC	ASBR
优 点	1. 较大的高径比, 20 或更高; 2. 采用出水循环, 更适合处理含悬浮固体和有毒物质的废水; 3. 极高的上升流速 5~10 m/h 和有机负荷率 40 kgCOD/(m ³ ·d); 4. 具有高活性、沉降性能良好的颗粒污泥且污泥粒径与强度较大; 5. SRT 较长	1. 高径比大, 占地面积小, 建筑投资省; 2. 有机负荷率高, 液体上升流速大, 出水稳定, 耐冲击负荷能力强; 3. 启动速度快, 处理率高, 运行稳定; 4. 可处理低、中、高浓度废水和含毒有机废水	1. 固液分离效果好, 出水澄清; 2. 对于不同的水质与水量, 可调整一个运行周期中各工序的运行时间及 HRT、SRT 来满足出水要求; 3. 不需要布水系统和澄清沉淀池; 4. 受温度影响小, 耐冲击负荷, 对各种废水的适应性强; 5. 具有沉降性能良好, 比产甲烷活性高的颗粒污泥
不 足	1. 需要培养颗粒污泥, 启动时间较长; 2. 为使污泥膨胀, 采用出水循环, 需要更高的动力	启动时间较长, 反应器内平均剪切速率较高, 颗粒污泥强度较低	1. 启动受接种污泥的种类及浓度影响很大, 需要搅拌装置; 2. 高浓度硝态氮和铵态氮会影响反应器的正常运行

同第一、二代厌氧反应器相比, 第三代厌氧反应器具有以下优势:

- ① 微生物均以颗粒污泥自固定化方式存在于反应器中, 单位容积内微生物持有量更高;
- ② 具有较大的高径比, 占地面积小, 动力消耗小;
- ③ 能承受更高的水力负荷, 具有较高的有机污染物净化效能;
- ④ 颗粒污泥与有机物之间具有更好的传质, 使反应器的处理能力大大提高。

1.2.1 厌氧滤池

厌氧滤池是采用填充材料作为微生物载体的一种高效厌氧反应器, 其填料一般选择孔隙率高、比表面积大、价格比较便宜的材料, 如卵石、碎石、砖块、陶瓷、塑料等。微生物附着在填料上生长, 形成生物膜, 生物膜再与填充材料一起形成固定的滤床。厌氧滤池通常有上流式和下流式两种形式, 如图 1-1 所示。以上流式厌

工业厌氧颗粒污泥自固定化过程中的流体力学

氧滤池为例来说明其原理。废水从反应器底部向上流动经过填料层,废水中的有机物在这里被微生物分解转化为甲烷和二氧化碳,同时微生物合成自身有机体,由于废水的组成在不同的反应器高度逐渐变化,因而微生物的种群分布也呈现出规律性。在反应器的底部,发酵菌和产酸菌占很大比重。随着高度的上升,产乙酸菌和产甲烷菌占逐渐主导地位。产生的沼气和出水由反应器上部分别排出,老化的生物膜随出水在后置沉淀池中形成剩余污泥。

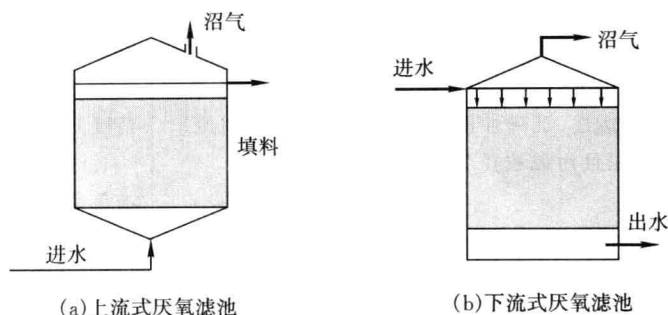


图 1-1 厌氧滤池

在相同条件下,AF 的 COD 负荷一般为 $5\sim 12 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,高出厌氧接触工艺 2~3 倍,处理溶解性废水时负荷可达 $10\sim 15 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ^[5]。厌氧滤池产生后,在工业废水处理领域得到广泛应用,并且与其它类型反应器组合应用取得较好的成果。Genany 的研究表明:在温度为 20°C 时,用 AF 直接处理进水 BOD_5 为 200 mg/L 的生活污水, BOD_5 的去除率可达 70%;Chernicharo 与 Machado 的研究发现:UASB/AF 系统 BOD_5 和 COD 去除率分别为 95% 和 85%,出水悬浮物含量也很低^[11]。

AF 中的污泥浓度通常为 $10\sim 20 \text{ gVSS/L}$,能适应有毒废水的处理,但由于孔隙率的限制,污泥床内容易发生堵塞和短流现象。一般适宜于处理含悬浮物少的可溶性有机废水,如化工废水、小麦淀粉废水、生活污水等。

1.2.2 厌氧流化床反应器

AFB 工艺是美国人 Jeris 和 Jewell 为解决厌氧滤池的堵塞和提高负荷等问题于 1974 年提出的,用于有机废水的处理。按照床层膨胀率的不同,分为流化床和膨胀床。上流式 AFB 示意图如图 1-2 所示。

AFB 借鉴了化工流态化技术,将微生物固定在小颗粒载体上形成生物粒子,以生物粒子为流化料,污水为流化介质,由外界施以动力,使生物粒子克服重力与流体阻力,形成流态化。常用的载体有石英砂、无烟煤、颗粒活性炭、玻璃球、陶粒等惰性载体,

载体粒径一般在 0.2~8 mm,比表面积 3300~10000 m²/m³,生物量可达 10~40 gVSS/L,反应器内液体流速可达 10~30 m/h^[12]。

AFB 反应器采用较大的高径比,废水通常由反应器底部进入并保持较高的上流速度,使载体形成流态化。由于载体颗粒粒径微小,在其上可以形成具有很大比表面积的生物膜。流态化的最高程度使废水和厌氧污泥充分接触,提高了有机质向生物膜的传质速率,处理效率也相应地提高,对水质变化如 pH 值、抑制物浓度、废水浓度等变化都有较大的适应能力。同时它还避免了厌氧滤池中易发生的堵塞问题,具有较高的容积负荷,减小了反应器的容积,节省了占地面积。它的主要不足之处是难以保持反应器内部稳定的流化态,因为流态化的真正形成必须依赖于所形成的生物膜在厚度、密度、强度等方面相对均一或形成的颗粒的均一,但生物膜的厚度受到厌氧污泥的增殖速率、自身分解、流化体冲击、接触时生物膜自然脱落及人为脱落等诸多因素的影响,其形成和剥落是难以进行控制的,因而难以保持真正的流态化。杨平等^[13]研究表明:选用多孔高分子材料聚丙烯酸酯(WAR-8)颗粒为载体,采用使微生物包络于载体内表面的固定化新方法,可以取得良好的微生物固定效果。

近年来随着 AFB 工艺的不断改进,厌氧流化床在高浓度含酚废水、印染废水、造纸废水、食品类废水等工业废水处理方面取得较好的效果。Khodadoust 等采用活性炭颗粒(GAC)流化床反应器处理 PCP(五氯苯酚)废水,其负荷为 4 g PCP/(kg GAC·d)时,PCP 的去除率大于 99.9%^[14];Suidan 等人在用活性炭厌氧流化床处理含邻苯二酚废水,进水浓度为 1000 mg/L,邻苯二酚负荷为 2.58 kg/(m³·d)时,去除率为 99%^[15];Garcia-Calderon 等采用下流式厌氧流化床工艺处理红酒酿造废水,在 TOC 负荷为 45 kg/(m³·d)时,去除率为 85%^[16]。

1.2.3 上流式厌氧污泥床反应器

1971 年荷兰 Wageningen 农业大学 Lettinga 教授通过物理结构设计,利用重力场对不同密度物质作用的差异,发明了气—液—固三相分离器。三相分离器使得活性污泥停留时间与废水停留时间实现了有效分离,形成了上流式厌氧污泥床(UASB)反应器的雏型。1972~1978 年间在 60 L、6 m³、30 m³ 和 200 m³ 逐次放大的小试、中试和生产性试验基础上,UASB 反应器于 20 世纪 80 年代初开始在高浓度有机工业废水的处理中得到了广泛的应用。

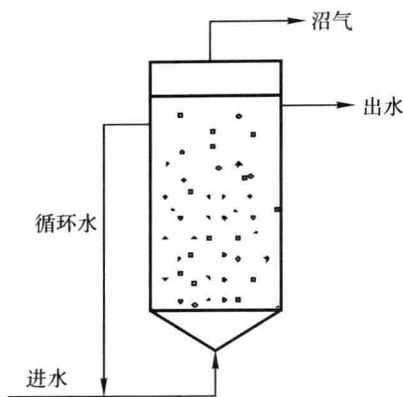


图 1-2 厌氧流化床反应器

工业厌氧颗粒污泥自固定化过程中的流体力学

1974年荷兰CSM公司在其 6 m^3 反应器处理甜菜制糖废水时,发现了活性污泥自身固定化机制形成的生物聚体结构,即颗粒污泥(granular sludge)。颗粒污泥的出现,不仅促进了以UASB为代表的第二代厌氧反应器的应用和发展,而且还为第三代厌氧反应器的诞生奠定了基础。UASB反应器是目前应用最为广泛的高效厌氧反应器。目前在全世界 $3/4$ 的厌氧污水处理厂中得到广泛应用。我国于1981年开始了UASB反应器的研究工作^[17,18]。该反应器结构见图1-3所示。

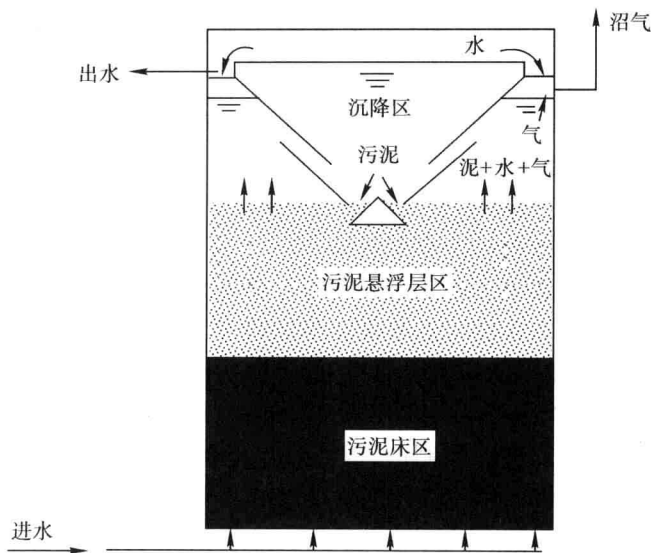


图 1-3 UASB 反应器结构示意图

UASB反应器可以分为三个功能区,分别是底部的布水区,中部的反应区和顶部的气液固三相分离区。废水从底部进入UASB反应器,通过布水区将待处理的废水均匀地分布在反应区的横断面上。反应区包括污泥床区和悬浮区,污泥床区位于反应器的最底部,其污泥浓度可高达 $60\sim 80\text{ g/L}$,具有良好的沉降和凝聚性能。废水与该部分污泥混合,废水中的有机物被污泥中的微生物分解为甲烷和二氧化碳,气体在上升过程中,对污泥床起到搅动和混合的作用,使得污泥床区以上的污泥呈松散悬浮状态。废水中的大部分有机物在反应区被分解转化。泥水混合液在气体的带动下,到达三相分离器下部,气体首先被分离进入集气室,并由管道引出。失去气泡搅动作用的污泥在顶部沉淀区发生絮凝,颗粒逐渐增大,并在重力作用下,返回底部反应区。

UASB反应器的一个突出特点就是采用了微生物细胞固定化技术,即利用物理或化学手段将游离的细胞或酶与固态的不溶性载体相结合,使其保持活性并可