

徐宏英 著

厌氧颗粒污泥 的 吸附特性及工程应用

YANYANG KELI WUNI

DE XIFU TEXING
JI GONGCHENG YINGYONG



化学工业出版社

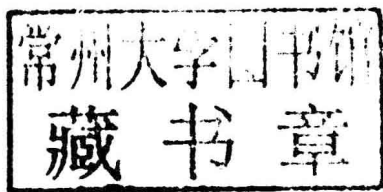
徐宏英 著

厌氧颗粒污泥的 吸附特性及工程应用

YANYANG KELI WUNI

DE XIFU TEXING

JI GONGCHENG YINGYONG



化学工业出版社

· 北京 ·

本书较为详细地阐述了厌氧颗粒污泥的结构、特性、吸附理论基础及相关研究进展,借助生物学手段揭示了厌氧颗粒污泥吸附有机污染物的机理,并就吸附过程进行了吸附动力学模型拟合;同时,从吸附剂、吸附质以及环境条件方面全面系统地分析了厌氧颗粒污泥吸附有机污染物的影响因素,提出了具有优良吸附性能的厌氧颗粒污泥的特征,总结了厌氧颗粒污泥吸附特性在工程中的应用,具有较强的实用性和参考价值。

本书可供环境科学与工程、市政工程等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考,也可供高等学校相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

厌氧颗粒污泥的吸附特性及工程应用/徐宏英著.北京:化学工业出版社,2012.3
ISBN 978-7-122-13399-1

I. 厌… II. 徐… III. 污泥利用-研究
IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 019121 号

责任编辑:刘兴春
责任校对:王素芹

装帧设计:史利平

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:三河市宇新装订厂
710mm×1000mm 1/16 印张12 $\frac{3}{4}$ 字数156千字, 2012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: 58.00 元

版权所有 违者必究

前言

Preface

水环境污染和能源短缺是两个世界性的问题。随着水环境污染渐趋严重、能源短缺危机日益加剧，厌氧生物处理工艺以其独特的技术优势越来越受到各国政府及专家学者的广泛关注。厌氧生物处理工艺不仅可以高效处理废水，而且可以产生甲烷、回收能量，是费用低廉、产能型废水处理工艺。厌氧颗粒污泥是第三代高效厌氧生物处理工艺的典型特征，是一种具有自我平衡的微生态系统，是不同类型、种群的微生物在废水生物处理过程中自身固定化而形成的一种共生或互生体系。厌氧颗粒污泥的形成创造了适合细菌生长、繁殖的生理生化条件，有利于细菌对营养的吸收及有机污染物的吸附降解；同时使发酵菌中间产物的扩散距离大大缩短，加强了传质效率；在废水性质突然变化时颗粒污泥能维持一个相对稳定的微环境，可使代谢过程高效进行。厌氧颗粒污泥的形成为厌氧生物处理工艺的高效稳定运行奠定了坚实的基础。

本书是关于厌氧颗粒污泥吸附特性及工程应用的专著，集成了著者多年的研究成果，较为详细地阐述了厌氧颗粒污泥的组成结构、特性、吸附理论基础及相关研究进展，借助生物学手段和热力学方法揭示了厌氧颗粒污泥吸附有机污染物的机理，并就吸附过程进行了吸附动力学模型拟合；同时，从吸附剂、吸附质以及环境条件等方面全面系统地分析了厌氧颗粒污泥吸附有机污染物的影响因素，提出了具有优良吸附性能的厌氧颗粒污泥的特征，总结了厌氧颗粒污泥吸附特性在工程中的应用。

本书拓展了废水厌氧生物处理的理论基础，拓宽了厌氧颗粒污泥技术的应用范围，也为实际工程的设计、操作提供了有力的依据，具有较强的实用

性和参考价值，可供环境科学与工程、市政工程等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考，也可供高等学校相关专业师生参阅。

本书的著作和出版得到国家自然科学基金项目“甲烷菌群优化吸附-生物降解厌氧序批式反应器工艺理论”（项目编号：30570342）、山西省科技厅攻关项目“ASBR中厌氧颗粒污泥对有机污染物的吸附降解”（项目编号：2007031177）以及太原科技大学博士启动基金项目“厌氧颗粒污泥对废水中染料的吸附性能”（项目编号：20112002）三个项目的资助；同时，在本书的著写中引用了大量的参考资料，同时得到导师李亚新教授的悉心指导以及导师课题组成员岳秀萍、端云的大力支持，也得到同事苏檠楠、王慕华的全力协助，特此表示衷心的感谢。

限于著者学识水平，许多问题还有待深入研究，加之著写时间仓促，书中一些认识和结论会受到现阶段研究结果和知识水平的限制，可能存在疏漏和不妥之处，敬请有关专家和读者不吝赐教，并提出批评意见和修改建议。

著者

2012年1月

目录

Contents

第1章	概述	1
1.1	厌氧颗粒污泥	2
1.1.1	厌氧颗粒污泥的发现	2
1.1.2	厌氧颗粒污泥的定义	3
1.1.3	厌氧颗粒污泥的优点	4
1.2	厌氧颗粒污泥的形成	5
1.2.1	厌氧颗粒污泥的形成过程	5
1.2.2	厌氧颗粒污泥形成的几种假说	7
1.2.3	厌氧颗粒污泥形成的影响因素	10
1.3	厌氧颗粒污泥的形态结构、组成、微生物相及特性	14
1.3.1	厌氧颗粒污泥的外观形态	14
1.3.2	厌氧颗粒污泥的结构	15
1.3.3	厌氧颗粒污泥的微生物相	18
1.3.4	厌氧颗粒污泥的化学组成	21
1.3.5	厌氧颗粒污泥的特性	22
1.4	吸附	31
1.4.1	吸附的类型	32
1.4.2	生物吸附	33
	参考文献	37

第2章 厌氧颗粒污泥吸附有机物的性能及机理····· 45

2.1 厌氧颗粒污泥吸附有机物的性能·····	45
2.1.1 实验目的·····	45
2.1.2 吸附实验装置·····	46
2.1.3 厌氧颗粒污泥初期吸附实验方法·····	46
2.1.4 厌氧颗粒污泥对废水中有机物 COD 的初期吸附去除·····	47
2.1.5 厌氧颗粒污泥吸附去除废水中有机物过程中 VFA 的 变化·····	48
2.1.6 厌氧颗粒污泥吸附去除废水中有机物过程中 CH_4 的 变化·····	50
2.1.7 结果分析·····	51
2.1.8 小结·····	53
2.2 厌氧颗粒污泥的吸附机理·····	54
2.2.1 吸附等温线·····	55
2.2.2 吸附热力学参数·····	59
2.2.3 同种厌氧颗粒污泥经不同处理后对有机污染物的 吸附·····	61
2.2.4 不同种厌氧颗粒污泥经相同处理后对有机污染物的 吸附·····	62
2.2.5 红外光谱·····	64
2.3 结论·····	66
参考文献·····	66

第3章 厌氧颗粒污泥的吸附动力学····· 69

3.1 吸附过程·····	69
3.2 吸附动力学模型·····	70
3.2.1 膜传质·····	70

3.2.2	颗粒间的扩散	71
3.2.3	准一级动力学模型和准二级动力学模型	71
3.3	厌氧颗粒污泥吸附的动力学	72
3.3.1	膜传质和颗粒间的扩散模型拟合	72
3.3.2	准一级反应动力学及准二级反应动力学模型拟合	74
3.4	小结	76
	参考文献	76

第4章 影响厌氧颗粒污泥吸附性能的因素 79

4.1	厌氧颗粒污泥特性对有机污染物初期吸附性能的影响	80
4.1.1	污泥粒径及比表面积	80
4.1.2	污泥生物活性和比产甲烷活性	83
4.1.3	污泥沉降性	85
4.1.4	污泥疏水性	87
4.1.5	污泥胞外多聚物	89
4.1.6	污泥表面 Zeta 电位	91
4.1.7	污泥微生物组成	93
4.1.8	污泥浓度	95
4.1.9	厌氧颗粒污泥良好吸附性能评价	96
4.2	废水特性对有机污染物初期吸附性能的影响	97
4.2.1	有机污染物浓度	98
4.2.2	不同粒径有机污染物 COD	100
4.2.3	不同溶解态有机污染物 COD	102
4.2.4	溶解态有机物葡萄糖	103
4.2.5	修正后不同溶解态有机污染物 COD	104
4.2.6	离子强度	107
4.2.7	重金属离子	108
4.2.8	毒性物质	109

4.2.9 小结	111
4.3 环境条件对厌氧颗粒污泥初期吸附性能的影响	113
4.3.1 pH值	113
4.3.2 温度	114
4.3.3 搅拌	116
4.3.4 小结	119
参考文献	119

第5章 厌氧颗粒污泥吸附特性的工程应用 123

5.1 厌氧颗粒污泥对有机污染物的吸附	123
5.1.1 AB-ASBR 工艺的提出	123
5.1.2 AB-ASBR 工艺流程	125
5.1.3 AB-ASBR 工艺的生物学基础	125
5.1.4 AB-ASBR 工艺特点	128
5.1.5 AB-ASBR 对啤酒废水的处理	129
5.1.6 AB-ASBR 和 ASBR 工艺运行效果对比	132
5.2 厌氧颗粒污泥对染料的吸附	144
5.2.1 染料废水及其来源	144
5.2.2 染料废水的危害	144
5.2.3 染料废水污染特性	145
5.2.4 染料废水的处理现状	145
5.2.5 厌氧颗粒污泥对染料的吸附	149
5.2.6 厌氧颗粒污泥对亚甲基蓝的吸附	149
5.2.7 AB-ASBR 反应器处理低浓度的亚甲基蓝废水	152
5.3 厌氧颗粒污泥对废水中难降解有机物的吸附	153
5.3.1 难降解有机物	153
5.3.2 难降解有机物的来源及危害	154
5.3.3 难降解有机物的特性	155

5.3.4	难降解有机物废水的处理现状	156
5.3.5	厌氧颗粒污泥对难降解有机物的吸附降解	159
5.3.6	厌氧颗粒污泥对邻苯二甲酸二丁酯的吸附	161
5.4	厌氧颗粒污泥对废水中重金属的吸附	165
5.4.1	重金属废水及其来源	165
5.4.2	重金属废水的危害	166
5.4.3	重金属废水污染特性	166
5.4.4	重金属废水的处理现状	167
5.4.5	重金属废水的生物吸附机理	168
5.4.6	厌氧颗粒污泥对重金属的吸附	170
5.4.7	厌氧颗粒污泥对 Hg^{2+} 的吸附	171
5.4.8	厌氧颗粒污泥对 Cr^{6+} 的吸附	180
5.4.9	填充柱工艺处理重金属污染废水	186
	参考文献	187

第1章

概 述

水环境污染和能源短缺是两个世界性的问题。随着水环境污染渐趋严重、能源短缺危机日益加剧，厌氧生物处理工艺以其独特的技术优势越来越受到各国政府及专家学者的广泛关注。厌氧生物处理工艺不仅可以高效处理废水，而且可以产生甲烷、回收能量，是费用低廉、产能型废水处理工艺。废水厌氧生物处理技术具有以下优点。

① 能耗少，无需用机械设备供氧，而且副产品甲烷是可回收利用的能源，每去除 1000 kgCOD 转化成的甲烷相当于 12×10^6 kJ 热能。

② 剩余污泥量少，处置污泥费用相当于好氧生物处理工艺的 10%。

③ 无尾气污染，没有挥发性气体吹脱到大气中。

④ 反应器有机负荷高，容积小，可降低基建投资。

近年来各国专家学者在以厌氧消化池为代表的第一代厌氧反应器、以厌氧滤池和厌氧接触工艺为代表的第二代厌氧反应器的基础上，相继研究开发出以厌氧膨胀颗粒污泥床 (Expanded

Granular Sludge Bed, EGSB)、厌氧内循环反应器 (Internal Circulation, IC)、厌氧折流板反应器 (Anaerobic Baffled Reactor, ABR) 和厌氧序批式反应器 (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, ASBR) 等为代表的第三代高速厌氧反应器。高速厌氧反应器的最大特点是持有高浓度的生物量, 延长生物在反应器中的停留时间 (SRT), 使 SRT 远大于水力停留时间 (HRT)。高速厌氧反应器一般以以下 3 种方式来保留反应器内高浓度厌氧微生物。

① 形成沉淀性能良好的厌氧颗粒污泥, 将其保留在反应器中。

② 利用反应器构型使悬浮的颗粒污泥截流下来。

③ 在反应器中形成生物膜。

在某些厌氧反应器中截留生物体是多于一种以上的方式在共同起作用, 而更多的高速厌氧反应器是在反应器中培养和形成沉降性能良好、产甲烷活性高的厌氧颗粒污泥, 厌氧微生物以颗粒污泥固定化的方式存在于反应器中, 单位容积的厌氧微生物持有量会更高。

1.1 厌氧颗粒污泥

1.1.1 厌氧颗粒污泥的发现

1971 年, 荷兰 Wageningen 农业大学 Letinga 教授发明了上流式厌氧污泥床 (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) 反应器, 后又在荷兰 CSM 糖厂水处理车间的 UASB 反应器运行过程中发现了一种具有优良理化和生物学特性、产甲烷活性很高的颗粒状厌氧污泥。这种颗粒污泥具有极好的沉降性能, 因

而能在很高的产气量和液体上流速度下存留在厌氧反应器内，使 UASB 反应器内维持高浓度的生物量。因此，污泥的颗粒化使 UASB 反应器可以在更高的有机物容积负荷和水力负荷下正常运行。一般絮状污泥的 UASB 反应器有机容积负荷在 $10\text{kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 以下，而颗粒污泥的 UASB 反应器负荷可高达 $30\sim 50\text{kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

1.1.2 厌氧颗粒污泥的定义

厌氧颗粒污泥是微生物凝聚的结果，是一种特殊的生物膜。许多微生物如细菌、酵母、霉菌和其他真菌等都能够发生凝聚作用，而凝聚是一种普遍存在的自然现象。微生物的这种凝聚对废水的生物处理是非常有用的。分散的单个菌体在溶液中不稳定，由于它们体积微小，密度比水小，并带有负电荷，很难沉降，因而容易被冲洗出水处理设备。凝聚使单个菌体吸附在一起，形成污泥颗粒，能提高污泥的沉降性能，有利于其保留在设备中。污泥颗粒化不仅可增加污泥的沉降性能，保证反应器中具有高浓度菌体，而且可改善污泥的生理条件，从而有利于菌体生长和它们之间的相互作用。Alphenaar 将颗粒污泥定义为具有自我平衡能力的微生态系统的、其特性特别适宜于上流式废水处理系统的微生物聚集体。

厌氧颗粒污泥被定义为具有自我平衡的微生态系统，是不同类型、种群的微生物在废水生物处理过程中自身固定化而形成的一种共生或互生体系，是一种特殊的生物膜。

在生长繁殖过程中，各类菌群的菌体本身所产生的胞外黏液物质将不同的菌体粘连起来并相互交融，丝状菌则穿插其间，对颗粒的形成起到缠绕和坚固作用。由此，不同类型的微生物种群在污泥颗粒的内外组成了互生或共生体系，使污泥颗粒形成了一个微生态系统。在此系统中，有利于形成多种菌群共同生长繁殖

和多种菌群协同对有机物降解的生化条件，构成了生物之间的优化组合和生物与环境之间的相互依托，为发挥颗粒污泥的群体活性创造了条件。

1.1.3 厌氧颗粒污泥的优点

厌氧颗粒污泥的形成创造了适合细菌生长、繁殖的生理生化条件，有利于细菌对营养的吸收及有机污染物的降解；污泥颗粒的形成使发酵菌中间产物的扩散距离大大缩短，加强了传质效率；在废水性质突然变化时（如 pH 值、毒性物的浓度及有机负荷等），颗粒污泥能维持一个相对稳定的微环境，使代谢过程继续进行；颗粒污泥众多的孔洞及巨大的空隙率有利于对有机污染物、重金属离子等底物的生物吸附。

厌氧颗粒污泥的优点概括如下。

① 细菌形成颗粒状的聚集体是一个微生态系统，其中不同类型的种群组成了共生或互生体系，有利于形成细菌生长的生理生化条件，并利于有机物的降解。

② 颗粒的形成有利于其中的细菌对营养的吸收。

③ 颗粒使发酵菌的中间产物的扩散距离大大缩短，这对复杂有机物的降解是重要的。

④ 在废水性质突然变化时（如 pH 值、毒性物的浓度等），颗粒污泥能维持一个相对稳定的微环境，使代谢过程继续进行。

因此以厌氧颗粒污泥为主体的厌氧反应器也具有以下显著的优势。

① 厌氧颗粒污泥的形成缩短了微生物细胞与细胞之间的距离，使不同类型的微生物细胞间的传质更容易。因为细胞之间的传质速率与其距离成反比，传质速率的提高也相应提高了生物代谢效率，所以有利于底物的降解，由此大大提高了颗粒污泥的比

产甲烷活性。

② 厌氧颗粒污泥的形成极为有效地改善了污泥的沉降性能，使生物体能够在高产气量、高上升水流流速状态下保留在反应器内，避免了微生物随出水而大量流失的可能性，有效地减少了游离于消化液中微生物个体数量，为保证出水水质创造了条件。

③ 厌氧颗粒污泥的形成还大大降低了厌氧微生物对底物抑制的敏感性，随着絮状污泥逐渐形成颗粒污泥，其抑制反应系数从 2.3 减小到 0.2。

④ 颗粒污泥的形成提高了反应器的容积负荷，以絮状污泥为主体的反应器，有机负荷较高时会使污泥大量流失，所以反应器负荷一般不超过 $5\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。只有在颗粒污泥作为微生物体的反应器中才允许有更高的有机容积负荷和水力负荷。所以说，只有形成了颗粒污泥的厌氧反应器才能有更高的有机负荷，才真正算得上高速厌氧反应器。

随后 20 多年来国内外的研究者对厌氧颗粒污泥的培养、性能及工程应用进行了广泛研究。研究和实践证明，厌氧颗粒污泥并非 UASB 反应器独有的特征，在厌氧流化床（Anaerobic Fluidized Bed, AFB）、上流式厌氧滤池（UAF）和厌氧序批式反应器（ASBR）中均能形成颗粒污泥，它为厌氧反应器高效稳定的运行奠定了基础。

1.2 厌氧颗粒污泥的形成

1.2.1 厌氧颗粒污泥的形成过程

Macleod 等认为，首先发生聚集的细菌是那些产乙酸菌。这

些细菌将为甲烷丝菌、甲烷八叠球菌提供所需的底物。由此，不同类型的细菌种群在污泥颗粒的内外组成了互生或共生体系，使污泥颗粒形成了一个微生态系统。在此系统中，有利于形成多种细菌共同生长的生化条件和细菌对有机物的降解。非甲烷菌在颗粒化初期具有重要的意义。

颗粒形成是从前体开始，前体包括甲烷丝菌和非甲烷菌的小聚集体。厌氧颗粒污泥的形成实际上是不同类型、群体的微生物在废水处理过程中自身固定化的过程。在各类菌群的生长繁殖过程中菌体本身所产生的胞外黏液物质将不同的菌体粘连起来并相互交融，丝状菌则穿插其间，对颗粒的形成起到缠绕和坚固作用。颗粒污泥的形成可划分为5步。

① 细胞转移至惰性或材料或其他细胞表面（见图 1-1）；

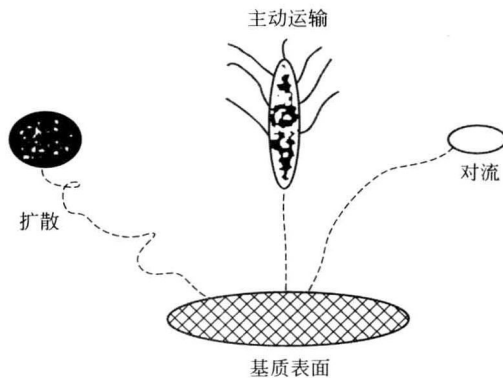


图 1-1 微生物细胞转移到
底物表面的不同机理

② 通过物理化学作用力使细胞可逆地吸附到“底物”表面（见图 1-2）；

③ 通过微生物的附属物和/或聚合物使细胞不可逆地附着在“底物”上（见图 1-2）；

④ 细胞进一步繁殖，形成初生颗粒污泥（见图 1-2）；

⑤ 初生颗粒污泥进一步完善结构和调整细菌的代谢而形成

表面光滑的、密度较大的成熟的颗粒污泥（见图 1-3）。

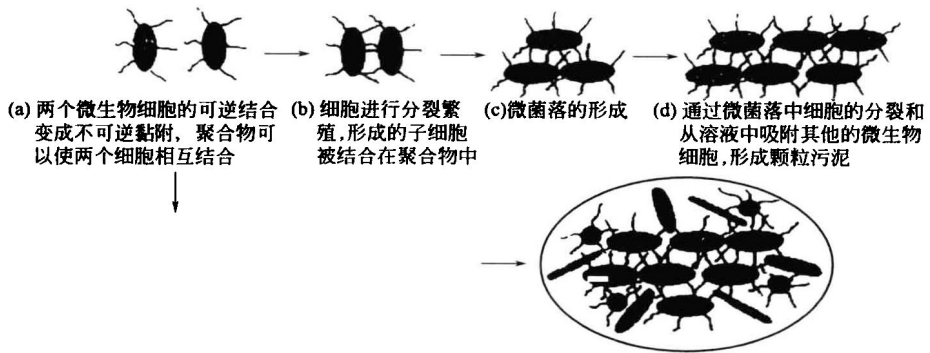


图 1-2 初始颗粒污泥的形成过程

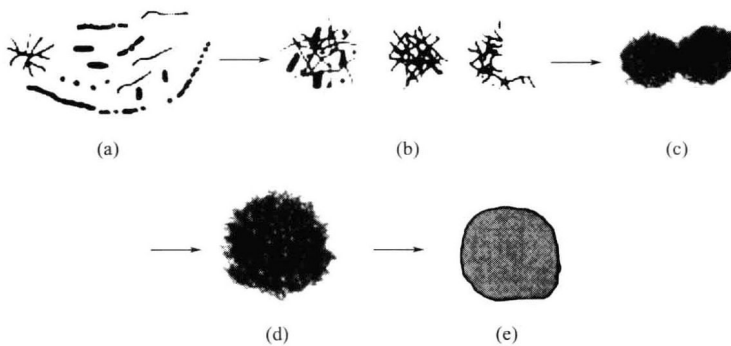


图 1-3 成熟颗粒污泥形成过程

1.2.2 厌氧颗粒污泥形成的几种假说

由于厌氧颗粒污泥的形成是个十分复杂的物理化学与微生物过程，到目前为止，还没有比较全面的理论能够清楚地阐明颗粒污泥的形成机理。现有的厌氧污泥颗粒化的理论和模型主要包括晶核假说、无机物作用说、惰性内核模型、选择压模型、多价阳离子架桥结合模型、胞外聚合物假说、合成和天然聚合物吸附架桥模型、Capetown 模型、Spaghetti 理论、营养型共生微生物