

# 污水处理颗粒污泥技术 原理与应用

吴昌永 王然登 彭永臻 编著

Granular Sludge Technology of Wastewater Treatment:  
Principles and Applications

中国建筑工业出版社

# 污水处理颗粒污泥技术 原理与应用

吴昌永 王然登 彭永臻 编著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

污水处理颗粒污泥技术原理与应用/吴昌永, 王然登, 彭永臻编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 7  
ISBN 978-7-112-13326-0

I. ①污… II. ①吴…②王…③彭… III. ①颗粒-污泥处理-研究 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 116642 号

颗粒污泥是由于微生物细胞的自絮凝作用而形成的由生物膜包裹的生物聚集体, 和普通的絮状活性污泥相比, 因其具有一些突出的优点而被视为污水生物处理技术中优先推荐的技术之一。本书从研究者普遍关注的颗粒污泥的性质入手, 对颗粒污泥的理化性质、影响颗粒污泥形成的因素、污泥的颗粒化机理和颗粒污泥的微观结构等基础理论给予论述; 详细介绍了强化生物除磷系统中颗粒污泥形成的机理及颗粒污泥的特性; 阐述了颗粒污泥技术在污水处理领域的不同应用, 并从基础理论出发对实际应用中出现的常见问题进行论述。

本书主要聚焦国内外近年来在污水处理颗粒污泥领域内的研究成果, 并为读者给出了非常详尽的参考文献, 以方便读者对感兴趣部分的深入阅读。本书论述范围较广, 在基础理论部分尽量做到详尽的论述, 在实际应用的篇章, 简单列举了一些研究实例, 理论联系实际, 使读者读后有的放矢。本书适用于环境科学与工程专业研究生教材及该领域内工程技术人员学习参考, 具有很高的针对性和实用性。

责任编辑: 于 莉 田启铭

责任设计: 张 虹

责任校对: 陈晶晶 刘 钰

## 污水处理颗粒污泥技术原理与应用

吴昌永 王然登 彭永臻 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14½ 字数: 350 千字

2011 年 9 月第一版 2011 年 9 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-13326-0

(20840)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

开发结构紧凑，占地面积小的高效生物反应器是未来污水生物处理领域的一个研究方向。同普通的絮状污泥相比，颗粒污泥具有密度大、强度高、结构稳定、沉淀性能突出等优点。这使得采用颗粒污泥的反应器可以保有较高的生物量，因而能够承受较高浓度的污染物和有毒物质的冲击，同时能够使得水处理构筑物具有紧凑的结构，较小的体积和占地面积，因而颗粒污泥技术受到越来越多的关注。

最初人们对颗粒污泥的报道局限于严格厌氧的系统中，直到 20 世纪 90 年代才有好氧颗粒污泥及其应用的报道。厌氧颗粒污泥技术存在一些固有的缺点，如启动时间较长，运行温度较高，处理低负荷污水的时候不够稳定以及在氮磷去除方面的效率较低，这也促进了人们对好氧颗粒污泥技术的研究。好氧颗粒污泥技术，作为一种崭新的污水生物处理技术，引起了污水生物处理领域研究者的极大关注。经过十多年的发展，好氧颗粒污泥技术的应用领域也在不断扩展，已不再局限于污水好氧处理，而应用于其他一些领域，如高浓度有机废水的处理；含酚类有毒废水的处理及生物修复，如苯酚、甲苯、嘧啶和印染废水中的颜料等；脱氮；除磷；脱硫；放射性废水及重金属的吸附处理等。尽管人们已经对好氧颗粒污泥形成的机理及控制好氧颗粒污泥形成的运行控制策略进行了大量的研究，有关颗粒污泥的研究成果国内外也已发表了大量的论文，但国内尚没有一本系统论述颗粒污泥技术原理及应用的专著。基于此，编者查阅了数百篇中英文文献并进行了总结，同时结合编者所在课题组在颗粒污泥方面的研究成果，编写了这本系统论述颗粒污泥技术的专业书籍。

本书共分 6 章：第 1 章颗粒污泥及其性质，简要介绍了颗粒污泥技术的发展和研究方向，同时结合近十几年来的最新进展，逐条详细介绍了颗粒污泥的理化性质。第 2 章颗粒污泥形成的影响因素，从水力选择压和生物选择压两个大的角度，详细介绍了影响颗粒污泥形成及其形状的因素，同时对其他运行控制因素，如 DO、温度、pH 及碱度等，对颗粒污泥形成的影响进行了论述。第 3 章污泥颗粒化机理，从几个假说的角度，如胞外聚合物、丝状菌假说、诱导核假说、金属阳离子假说和微生物自凝聚假说等，阐述了污泥颗粒化机理的最新研究进展。第 4 章颗粒污泥的微观结构，按照厌氧颗粒污泥和好氧颗粒污泥，详细介绍了颗粒污泥的形态、内部结构特征和微生物种群及分布，同时对颗粒污泥中的 EPS 分布进行了介绍。第 5 章强化生物除磷系统中颗粒污泥形成及机理研究，系统研究了 SBR 系统从脱氮至除磷状态的污泥形状变化，同时对除磷状态下颗粒污泥的形成机理进行了阐释，最后从宏观到微观角度对除磷颗粒污泥的性质进行了研究。第 6 章颗粒污泥技术应用简介，结合国内外最新研究进展，对颗粒污泥在有机物、重金属离子、有毒物质和氮磷等的去除中的应用进行了简单介绍。

本书第 1 章由彭永臻和吴昌永负责编写，第 2 章和第 3 章由王然登负责编写，第 4 章至第 6 章由吴昌永负责编写，全书由吴昌永负责统稿。

本书涉及的研究工作得到了国家自然科学基金（50808004）和城市水资源与水环境国家重点实验室（哈尔滨工业大学）开放基金的资助（QAK200802）。在本书编写过程中，参阅了国内外相关学术论文数百篇，此处难以一一列出，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，在诸多问题的研究和认识上还欠深刻，书中不足和错误在所难免，恳请读者批评指正，以便再版时更正。

**编者**

**2011年6月**

# 目 录

<b>第 1 章 颗粒污泥及其性质</b> .....	1
1.1 前言 .....	1
1.1.1 颗粒污泥技术简介 .....	1
1.1.2 颗粒污泥技术的特点和应用 .....	2
1.1.3 颗粒污泥技术存在的问题和研究方向 .....	3
1.2 颗粒污泥的性质 .....	4
1.2.1 沉淀性能和渗透性 .....	4
1.2.2 机械强度 .....	12
1.2.3 形态特性 .....	17
1.2.4 孔隙特性 .....	22
1.2.5 粒径特性 .....	27
1.2.6 流变特性 .....	30
1.2.7 吸附特性 .....	31
1.2.8 表面特性 .....	36
1.2.9 胞外聚合物 .....	42
参考文献 .....	47
<b>第 2 章 颗粒污泥形成的影响因素</b> .....	59
2.1 水力选择压 .....	59
2.1.1 反应器类型 .....	60
2.1.2 水力停留时间 (HRT) .....	62
2.1.3 沉淀时间 .....	64
2.1.4 容积交换率 .....	65
2.1.5 排水时间 .....	66
2.1.6 水力剪切力 .....	68
2.2 生物选择压 .....	81
2.2.1 碳源类型对颗粒污泥特性的影响 .....	81
2.2.2 有机负荷率对颗粒污泥形成及其特性的影响作用 .....	86
2.2.3 不同 C/N/P 比值对颗粒污泥的形成及其特性的影响作用 .....	95
2.2.4 饱食-饥饿期 .....	96
2.2.5 接种污泥种类及接种量 .....	100
2.2.6 微生物的生长速率 .....	105
2.3 其他影响因素 .....	107
2.3.1 溶解氧浓度 (DO) .....	107

2.3.2	温度	108
2.3.3	pH 及碱度	110
2.3.4	游离氨 (FA) 浓度	112
2.3.5	金属离子浓度	114
2.3.6	载体物质	116
2.3.7	影响因素的关联作用	122
	参考文献	123
<b>第 3 章</b>	<b>污泥颗粒化机理</b>	132
3.1	污泥颗粒化过程模型	132
3.2	污泥颗粒化机理假说	135
3.2.1	胞外聚合物 (EPS) 假说	135
3.2.2	丝状菌假说	145
3.2.3	诱导核假说	146
3.2.4	金属阳离子假说	147
3.2.5	微生物自凝聚假说	148
3.2.6	各种假说的合理、矛盾及有待发展之处	149
	参考文献	149
<b>第 4 章</b>	<b>颗粒污泥的微观结构</b>	155
4.1	厌氧颗粒污泥的微观结构特征及微生物相	155
4.1.1	厌氧颗粒污泥的形态及内部结构特征	155
4.1.2	厌氧颗粒污泥中的微生物种群及分布情况	158
4.2	好氧颗粒污泥的微观结构特征及微生物相	162
4.2.1	好氧颗粒污泥的形态及内部结构特征	162
4.2.2	好氧颗粒污泥中的微生物种群及分布情况	163
4.2.3	好氧颗粒污泥的 SND 及 SNDPR 性能	169
4.3	颗粒污泥中的 EPS 分布	173
	参考文献	176
<b>第 5 章</b>	<b>强化生物除磷系统中颗粒污泥形成及机理研究</b>	179
5.1	研究背景	179
5.2	脱氮至除磷状态下污泥的形态变化	180
5.2.1	生物脱氮状态下污泥的形态特性	180
5.2.2	脱氮至除磷状态下系统中污泥的形态特性变化	181
5.2.3	脱氮至除磷状态下污泥的沉降特性变化	184
5.3	除磷颗粒污泥的宏观和微观特性	185
5.3.1	除磷颗粒污泥的形态特征及微生物相	185
5.3.2	除磷颗粒污泥的粒径分布及其沉降速率	185
5.3.3	除磷颗粒污泥的含水率、密度、机械强度及生物活性	188
5.3.4	除磷颗粒污泥的空隙特性	189
5.3.5	颗粒污泥的元素空间分布	190

5.3.6	颗粒污泥的粒径和孔径与除磷活性间的关系	191
5.4	强化生物除磷颗粒污泥的形成机理	192
5.4.1	颗粒污泥形成过程中污泥中 EPS 的变化情况	192
5.4.2	除磷颗粒污泥形成机理及步骤探讨	194
5.5	运行方式对系统中颗粒污泥形成的影响作用	198
5.5.1	研究思路	198
5.5.2	A/O 运行方式下系统中污泥的特性变化	199
5.5.3	A/O 运行方式下颗粒污泥的形成机理分析	202
	参考文献	205
<b>第 6 章</b>	<b>颗粒污泥技术应用简介</b>	<b>207</b>
6.1	颗粒污泥反应器	207
6.1.1	UASB 反应器及其特点	207
6.1.2	EGSB 反应器及其特点	208
6.1.3	IC 反应器及其特点	209
6.1.4	几种厌氧反应器特点比较	210
6.2	颗粒污泥技术应用简介	211
6.2.1	厌氧颗粒污泥在高浓度有机废水处理中的应用	211
6.2.2	好氧颗粒污泥在较高浓度有机废水及城市污水处理中的应用	212
6.2.3	对重金属离子的吸附	215
6.2.4	有毒有机废水的处理	216
6.2.5	对污水中氮磷的去除	217
6.2.6	对其他废水的处理	221
	参考文献	221



# 第 1 章 颗粒污泥及其性质

## 1.1 前 言

### 1.1.1 颗粒污泥技术简介

在当前污水处理技术领域，活性污泥法是应用最为广泛的技术之一，自 20 世纪初期于英国的曼彻斯特建成试验污水厂开创以来，至今已有近百年的历史。活性污泥开创初期采用的是以絮状污泥为主的悬浮活性污泥法，大多数的污水处理厂至今也主要以絮状悬浮污泥状态来运行。

颗粒污泥最初是随着有机工业废水的处理而出现的，最早是出现在一些厌氧反应器中。Young 和 McCarty 于 20 世纪 70 年代曾在厌氧滤清器中观察到颗粒污泥。那是一种改进型的厌氧滤清器，用来处理工农业污水，采用升流模式运行，当时没有人注意到这种污泥是怎样形成的。1976 年研究者在荷兰 Breda 的 CSM 糖厂的一个  $6\text{m}^3$  的反应器中也发现了颗粒污泥，因为反应器里获得的污泥效果比 Wageningen 大学更早前在实验室里取得的好，颗粒污泥的重要性引起了人们的重视。自 20 世纪 80 年代开始 Lettinga 等学者对升流式厌氧污泥床反应器（Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB）中的颗粒污泥及其应用进行了大量的研究，人们对颗粒污泥的认识才逐渐系统起来。目前，厌氧颗粒污泥技术已经在高浓度有机废水的处理工程中得到了大量的应用。

与之相对的是，好氧颗粒污泥技术的出现则要晚很多。1991 年，Mishima 等学者首次报道了在连续运行的好氧升流污泥床（Aerobic Upflow Sludge Blanket, AUSB）反应器中出现的好氧颗粒污泥。但是 AUSB 反应器运行条件要求较为苛刻，需要纯氧曝气才能培养出颗粒污泥。随后在 1993 年 Debeer 等学者在流化床反应器中，利用进水在反应器外预先曝气的方法培养出了硝化颗粒污泥，但反应体系的回流比需要维持在较高的水平，而且培养的硝化污泥的硝化能力较弱。此阶段好氧颗粒污泥培养的诸多限制，导致好氧颗粒污泥的研究即使在实验室范围内都受到很大限制。20 世纪 90 年代中期对污泥膨胀的研究为好氧颗粒污泥研究发展带来革新动力。Krishna 等学者发现，聚- $\beta$ -羟基丁酸酯（poly- $\beta$ -hydroxybutyrate, PHB）等多聚物在细胞内的累积，有利于提高污泥沉降性能；而周期性快速进水的序批式反应器（SBR）可以促进 PHB 的累积。Morgenroth 等借鉴厌氧颗粒在 SBR 中的培养经验，成功地以有机物为基质在 SBR 中培养出了好氧颗粒污泥。SBR 培养模式为好氧颗粒污泥研究奠定了基础，为目前大多数研究者所采纳。在此基础上，好氧颗粒污泥的研究在 1997 年后迅速展开。至今，关于好氧颗粒污泥的研究也大量的开展起来。目前，颗粒污泥工艺已经是污水处理领域的推荐技术之一，在某些特种废水的处理中得到一定的应用。但总体来看，好氧颗粒污泥存在运行能耗高等问题，其实际应用不如厌氧颗粒污泥广泛。

### 1.1.2 颗粒污泥技术的特点和应用

同普通的絮状活性污泥相比，颗粒污泥具有一些突出的优点。比如颗粒污泥具有相对规则的外形，密度大，强度高，结构较为稳定，尤其是沉淀性能较为突出。这些优点使得采用颗粒污泥的反应器可以保有较高的生物量，因而能够承受较高浓度的污染物和有毒物质的冲击，同时能够使得水处理构筑物具有紧凑的结构，较小的体积和占地面积。表 1.1 是普通絮状活性污泥和颗粒污泥的性质比较。从表中可以看出，颗粒污泥的这些优点使得采用颗粒污泥的反应器的有机负荷要比普通的絮状活性污泥法高很多。

普通絮状活性污泥和颗粒污泥的性质比较

表 1.1

项 目	普通絮状活性污泥	颗粒污泥
粒径(絮体尺寸)( $\mu\text{m}$ )	<100	100~5000
湿密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1002~1006	1010~1080
沉淀速度( $\text{cm}/\text{s}$ )	0.17~0.42	0.37~6.60
工艺有机负荷[ $\text{kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ]	0.5~2.5	5~70

颗粒污泥根据形成及应用条件的不同可以分为厌氧颗粒污泥和好氧颗粒污泥两大类。厌氧颗粒污泥的形成是高效厌氧反应器成功启动的关键。人们最初在 UASB 中对厌氧颗粒污泥进行了大量的研究，UASB 也在大量的污水处理工程中得到了广泛应用。UASB 具有较高的运行稳定性和污染物去除效率，其改进和变形形式，如厌氧污泥膨胀床 (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB) 和内循环反应器 (Internal Circulation Reactor, IC) 等也被广泛用于市政和工业废水的处理，尤其是高浓度的有机废水。对于污水生物处理系统而言，没有一种微生物可以单独降解进水中所有的污染物，污染物的降解过程是多种微生物协同作用的结果，因此厌氧颗粒污泥在工业废水处理过程中具有很多优势，同时颗粒污泥内的微生物间的距离较小，协同作用较强。通常，在厌氧反应器中，颗粒污泥可维持在较高的浓度，使得系统有较高的容积负荷，反应器的容积较普通悬浮活性污泥工艺要小很多。但是，厌氧颗粒污泥技术也存在一些固有的缺点。对于厌氧颗粒污泥来讲，由于其生长十分缓慢，因此厌氧反应器的启动时间通常很长，而且厌氧系统的运行操作温度及其稳定性要求较高等，这些缺点也限制了其更大规模的应用。

好氧颗粒污泥技术，作为一种崭新的污水生物处理技术，也引起了污水生物处理领域研究人员的极大关注。从理论角度考虑，如果在活性污泥系统中实现污泥的颗粒化，形成好氧颗粒污泥，则可集中絮体活性污泥和厌氧颗粒污泥的优点，并且能够避免两者由于结构所造成的缺陷，是一种较为理想的废水生物处理形式。经过十多年的发展，好氧颗粒污泥技术的应用领域也在不断扩展，已不再局限于污水好氧处理，而应用于其他一些领域，比如高浓度有机废水的处理；含酚类有毒废水的处理及生物修复，如苯酚、甲苯、嘧啶和印染废水中的颜料等；脱氮；除磷；脱硫；放射性废水及重金属的吸附处理等 (表 1.2)。但是，对于好氧颗粒污泥技术来讲，由于出水的悬浮物浓度 (Suspended Solids, SS) 较高，而且运行过程中需要维持较高的曝气强度，消耗大量的能耗，因而也限制了其更大规模的应用。

好氧颗粒污泥在实际工业废水处理中的应用

表 1.2

废水种类	总 COD ( $\text{mg}/\text{L}$ )	溶解性 COD ( $\text{mg}/\text{L}$ )	有机负荷 [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ]	COD 去除率 (%)	颗粒粒径 ( $\text{mm}$ )
麦芽废水	1700	—	3.2	50~80	—
乳制品废水	500~3000	300~1500	1.0~7.0	85~95	1.2~4.0

续表

废水种类	总 COD (mg/L)	溶解性 COD (mg/L)	有机负荷 [kg/(m <sup>3</sup> ·d)]	COD 去除率 (%)	颗粒粒径 (mm)
乳制品废水	2800	1500	4.5~5.9	90	3.0~5.0
屠宰废水	7685	5163	1.7~2.6	98	1.7
啤酒废水	1300~2300	1000~2000	3.0~3.5	88.7	2.0~7.0
豆制品废水	—	2000	1.5~6.0	98~99	1.22

### 1.1.3 颗粒污泥技术存在的问题和研究方向

颗粒污泥技术是一种具有很大应用前景的污水处理技术，尤其是在高浓度和有毒废水处理领域。在很多情况下，颗粒污泥工艺是处理高负荷、有毒污染物和沉淀容积有限情况下的废水处理的首选工艺，其出水水质要好于一般的传统活性污泥法。目前，该技术主要存在以下几个问题和研究方向：

(1) 污泥的颗粒化机理研究。人们对污泥的颗粒化机理已经进行了较为系统的研究，提出了一系列的假说和机理。早期 Lettinga 等学者提出了厌氧颗粒污泥形成的晶核假说，他们认为颗粒污泥的形成类似于结晶过程，在晶核基础上，颗粒不断发育，直到最后形成成熟的颗粒污泥，晶核来源于接种污泥或在运行过程中产生的无机盐，如 CaCO<sub>3</sub> 或者其他物质。但是也有很多研究表明，在多数成熟的颗粒污泥中很难找到晶核。颗粒污泥的形成可以不以晶核为基础成长，而是完全靠微生物本身形成的，在此基础上，不同的学者又提出了阳离子的电中和假说、胞外聚合物的架桥假说和包埋假说等，试图从不同的角度来解释颗粒污泥形成的过程，但是每个学说都存在一定应用性和局限性，这可能是由于不同的研究中不同的因素对颗粒污泥的形成起了关键作用。关于好氧颗粒污泥的形成机理，Liu 和 Tay 两位学者提出了四步假说，即接触-吸引-稳定-生长-成熟过程。可以说，在污泥的颗粒化机理这个问题上，人们的认识在不断进步，可是每种机理似乎适于解释某种特定的试验结果，具有一定的局限性。污泥的颗粒化机理和过程始终是颗粒污泥技术的一个研究热点和难点。

(2) 厌氧颗粒污泥技术在实际工程中已经大量应用，可是厌氧颗粒污泥反应器存在启动周期长，启动困难等问题，这在目前并未得到有效解决。因此，厌氧颗粒污泥反应器的加速启动策略是一个研究热点。

(3) 好氧颗粒污泥和厌氧颗粒污泥的形成机理是否相似也需要进一步的研究。

(4) 尽管好氧颗粒污泥可以在短期内形成，但由于异养微生物生长较快，好氧颗粒污泥在培养和应用上还存在一些问题。好氧颗粒污泥的形成和稳定对反应体系的条件有较严格的要求，好氧颗粒污泥经常因反应器负荷、DO 或剪切控制不当导致膨胀解体，沉降性能恶化，并最终造成运行失败。此外，好氧颗粒污泥运行的能耗高，不利于放大。好氧颗粒污泥需要高曝气量来满足其形成与结构维持的剪切需求，这在很大程度上限制了好氧颗粒污泥的工业化放大。好氧颗粒污泥的稳定性和低能耗运行也是研究的重点之一。

(5) 在连续流中培养好氧颗粒污泥及其维持是一个难点。

(6) 在颗粒污泥中生存的微生物生长在一个较为狭窄的空间内，微生物的生态位接近，由于遗传因素接近等原因使得细菌可以有较高的增殖速率，有的研究就发现在生物膜的水平层面存在着基因物质的传递和进化。这种传递很可能也存在于颗粒污泥中，但是需要研究进一步证实。

(7) 如何在颗粒污泥中移植特定的基因工程菌, 使得颗粒污泥具有处理特定废水的能力并维持较为稳定的颗粒污泥结构, 这也是需要研究的方向。

## 1.2 颗粒污泥的性质

在颗粒污泥反应器中, 颗粒污泥的形成是一个非常复杂的过程, 这个过程包括了不同营养类型的微生物, 以及它们的物理化学和微生物相互作用。颗粒污泥的一些特性, 比如沉淀速度、渗透性、尺寸分布、疏水性、物理强度、生物活性和胞外聚合物 (Extracellular Polymeric Substances, EPS) 特性等, 都是人们所重点关注的。

颗粒污泥的理化特性取决于反应器的运行条件 (如污泥或水力停留时间和有机负荷率等) 和污水的组成情况。对于一个稳定运行的反应器来讲, 如果能够确定颗粒污泥的性质将是十分重要的, 因为这些数据可以作为反应器设计和运行的基础。因此, 阐明颗粒污泥的理化特性是十分有必要的。从另一方面讲, 颗粒污泥技术也存在一些缺陷。对于厌氧颗粒污泥来讲, 由于其生长十分缓慢, 导致厌氧反应器的启动时间很长; 对于好氧颗粒污泥技术来讲, 由于出水的 SS 浓度较高, 而且需要维持较高的曝气强度, 消耗大量的能耗, 因而也存在不足。所以, 对颗粒污泥的理化性质有一个较好的理解也有助于克服颗粒污泥技术的一些缺陷。

本节系统介绍了颗粒污泥的主要性质, 同时系统回顾了过去十年中人们在这些理化性质方面研究得到的最新成果, 以便给读者提供最新最前沿的知识。

### 1.2.1 沉淀性能和渗透性

#### 1.2.1.1 颗粒污泥的沉淀性能

在传统的活性污泥工艺中, 固液分离性能是一个非常重要的指标, 它影响到二沉池中泥水分离的效果和剩余污泥的脱水性能。二沉池中的污泥沉淀性能差是污水厂运行过程中经常遇到的问题之一。沉淀速率是决定泥水分离的一个关键的参数, 该特性能够决定污水生物处理系统中的出水水质。通常来讲, 对于污水生物处理系统, 微生物聚集体沉降性能一般以污泥容积指数 (Sludge Volume Index, SVI) 和污泥最小沉降速率两个指标来衡量, 在实际工程中, 以前者的应用最为广泛。SVI (mL/g) 指泥水混合液经 30min 静沉后, 相应的 1g 干污泥所占的容积, 其计算公式为:

$$SVI = \frac{SV \times 1000}{MLSS \times 100} \quad (1-1)$$

其中: SV (Settling Velocity) 是指 100mL 混合液, 沉淀 30min 后, 污泥层所占有体积 (mL); MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) 是混合液中悬浮固体浓度 (g/L)。

SVI 值能较好地反映出活性污泥的松散程度和凝聚沉降性能, 但只有在相同浓度范围内测得的 SVI 值才有可比性, 另因测定容器的大小对测定的数值有一定的影响, 该指标的测定必须统一测定容器。对于普通的絮状活性污泥处理系统, 活性污泥 SVI 值通常在 50~300mL/g 之间, 对于处理生物污水和城市污水的污水处理厂, 其污泥的 SVI 通常在 70~150mL/g 之间。SVI 数值小说明污泥的沉淀性能好, 但过低可能是污泥中无机杂质含量高导致的, 这种情况下污泥的活性通常也不高; 而 SVI 值过高的污泥, 其沉淀性能通常较差, 而且可能面临着污泥膨胀的危险。颗粒污泥跟传统的絮状污泥相比最大的一个

优点是颗粒污泥拥有良好的沉淀性能。一般来讲，颗粒污泥的 SVI 值通常低于 50mL/g。表 1.3 是在一些研究中获得的颗粒污泥的 SVI 值和沉淀速率，从表中可以看出，在不同的研究中，污水水质不同，形成的颗粒污泥的沉淀性能也有所差别。有的学者研究发现，甚至在同一个反应器的不同部位培养得到的颗粒污泥，其沉淀性能也不尽相同。

不同研究中颗粒污泥的 SVI 值和沉淀速率 表 1.3

序号	反应器形式	污水来源	SVI(mL/g)	沉淀速率(m/h)	说明
1	ABR	人工配水	0~38.7	28.98~40.10	厌氧颗粒污泥
2	ABR	人工配水	10~20	18~100	厌氧颗粒污泥
3	UASB	人工配水	15.6	23.25~66.29	厌氧颗粒污泥
4	SBAR	人工配水	<15.0	—	好氧颗粒污泥
5	EGSB	人工配水	—	39.19~72.74	厌氧颗粒污泥
6	SBR	生活污水	<50	60~100	好氧颗粒污泥
7	MBR	生活污水	30	33.5	好氧颗粒污泥
8	IC	造纸综合废水	—	35.4~98.4	厌氧颗粒污泥
9	SBR	人工配水	<50	20~30	好氧颗粒污泥
10	SBAR	人工配水	23	18~31	好氧颗粒污泥

### 1.2.1.2 颗粒污泥沉淀速率的理论计算

区域沉淀速度是常用的描述活性污泥沉淀性能的一个参数，Vesilind 提出的区域沉淀模型是最常用的描述活性污泥沉淀行为的一个模型，其计算公式如下：

$$V_s = V_0 e^{-kx} \quad (1-2)$$

式中  $V_s$  是沉淀速率， $V_0$  是初始沉淀速率， $k$  是经验沉淀参数。通常情况下，絮状活性污泥的沉淀速率在 6~15m/h 之间，其数值要显著低于颗粒污泥（表 1.3）。

Vesilind 公式仅仅考虑了污泥浓度对沉淀速率的影响，很多研究表明这个公式并不能充分和准确的描述污泥的沉淀行为，尤其是污泥的 SVI 不同的时候。为了考虑 SVI 对活性污泥沉淀行为的影响，不同学者提出了很多不同的修正模型和预测公式。不过也应该看到的是，不论是 Vesilind 公式还是后期人们提出的修正公式，关于絮体尺寸对沉淀行为的影响都被忽略了。这反过来也说明这些针对活性污泥提出的公式可能对尺寸更大的好氧或者厌氧颗粒污泥可能并不适用。国外 Liu 等学者于 2005 年提出了一个描述好氧颗粒污泥沉淀行为的模型，这个模型对指导颗粒污泥反应器的设计和运行提供了理论依据。

在该研究中，试验部分采用了三个圆筒状的 SBR 反应器（R1~R3），每个反应器的高度均为 100cm，内径为 5cm；三个反应器运行的容积交换比分别为 60%、40%和 20%；在三个反应器中，污水的初始 COD 浓度均为 1000mg/L，曝气量均为 3L/min，曝气头固定在反应器的底部；每个反应器的接种污泥量为 500mL，采用乙酸钠作为碳源配水运行反应器。

正如前面提到的那样，在以 Vesilind 等学者为代表提出的活性污泥沉淀公式中忽略了污泥絮体对沉淀行为的影响，这是由于活性污泥的絮体大小较小，通常其粒径尺寸小于 100 $\mu$ m，而且活性污泥通常较为均一。然而，在好氧颗粒污泥反应器中，颗粒污泥的粒径差别较大，通常其粒径在 0.25~9mm 之间。在这种条件下，粒径大小对沉淀的影响就必

须考虑进去，根据 Stokes 公式，颗粒的沉淀速率可以用下面的公式描述：

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)d_p^2}{18\mu} \quad (1-3)$$

式中  $V_s$ ——单个颗粒的沉淀速率；

$d_p$ ——颗粒的直径；

$\rho_p$ ——颗粒的密度；

$\rho$ ——溶液的密度；

$\mu$ ——溶液的黏度。

这个公式表明颗粒的沉淀主要受到其密度和尺寸的影响。在好氧颗粒污泥工艺中，如前面的描述，SVI 反映污泥絮体的紧密程度，当 30min 沉淀完成后，污泥部分的容积可以认为是湿污泥的净体积，对公式 (1-1) 进行变形，得到：

$$\frac{1}{SVI} = \frac{\text{污泥干重}}{\text{湿污泥体积}} \quad (1-4)$$

事实上，公式左边  $1/SVI$  代表了悬浮固体的干密度，其等同于公式 (1-3) 中的  $\rho_p - \rho$ ，即：

$$\rho_p - \rho = \frac{1}{SVI} \quad (1-5)$$

将公式 (1-5) 代入公式 (1-3) 得到：

$$V_s = \frac{g}{18\mu} \frac{d_p^2}{SVI} \quad (1-6)$$

很多研究表明在生物处理反应器中混合液的黏度是污泥浓度的指数函数，即：

$$\mu = ae^{\beta X} \quad (1-7)$$

式中  $X$ ——污泥浓度；

$a$  和  $\beta$ ——常数。

将公式 (1-7) 代入公式 (1-6) 得到：

$$V_s = \alpha \frac{d_p^2}{SVI} e^{-\beta X} \quad (1-8)$$

式中  $\alpha$ ——常数，在数值上等于  $g/18a$ 。

公式 (1-8) 表明颗粒污泥的沉淀速率跟颗粒的尺寸、SVI 和污泥浓度有关。

将公式 (1-8) 进行线性化，得到如下公式：

$$Y = \ln \alpha - \beta X \quad (1-9)$$

其中：

$$Y = \ln \left( \frac{V_s \times SVI}{d_p^2} \right) \quad (1-10)$$

因此，依据公式 (1-9) 做出的直线其斜率应为  $-\beta$ ，截距为  $\ln \alpha$ 。在前面描述的试验中，共采用了三个 SBR 反应器 R1、R2 和 R3，三个反应器的容积交换比不同，通过测定不同反应器中得到的不同尺寸的颗粒污泥，污泥的浓度、SVI 和相应的沉淀速率等数据，可以对理论计算和实际测定的数据进行对比。在 Liu 等学者进行的研究中，发现试验数据和公式计算出来的结果非常接近，相关的回归系数约为 0.88~0.94。同样对公式 (1-2) 进行线性化，则可以写成下面的形式：

$$\ln V_s = \ln V_0 - kX \quad (1-11)$$

公式 (1-11) 也表明  $\ln V_s$  和  $X$  之间存在线性关系, 直线的斜率为  $-k$ , 截距为  $\ln V_0$ 。Liu 等学者通过 R1-R3 的试验测得的数据和公式计算出的数据进行对比, 发现采用 Vesilind 公式计算颗粒污泥的沉淀速率并不合适, 相关的拟合回归系数在 0.086~0.62 之间。

Liu 等学者又进一步通过其他试验方法验证了提出的模型。试验采用好氧颗粒污泥进行, 污泥的粒径在 0.23~2.4mm 之间, 不同粒径的污泥在试验中维持相同的浓度为 1.2mg/L, 在这种条件下, 公式 (1-8) 可以被简化为:

$$V_s = \gamma \frac{d_p^2}{SVI} \quad (1-12)$$

$$\gamma = ae^{-kX} \quad (1-13)$$

通过试验中测得的数据, 做出  $d_p^2/SVI$  和  $V_s$  之间的线性图如图 1-1 所示。图中的数据点是 SBR 的容积交换比为 40% 时得出的数据, 从图中可以看出, 试验得出的数据点跟公式的计算结果符合的较好, 试验得出的  $\gamma$  值为  $3.4 \times 105 \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ , 相应的拟合回归系数高达 0.94。这些结果同样也说明采用 Liu 等学者公式 (1-8) 计算颗粒污泥的沉淀速率较为科学合理, 而 Vesilind 公式则比较适合用于计算普通的絮状活性污泥的沉淀速率。

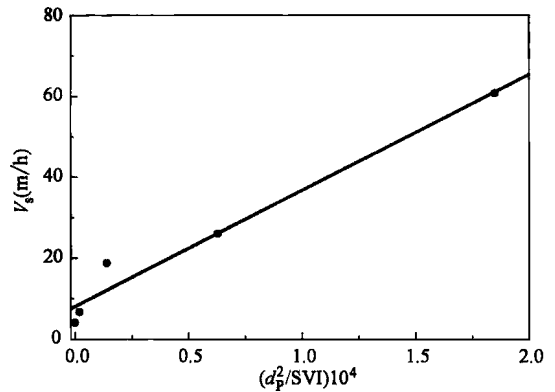


图 1-1 好氧颗粒污泥的沉淀速率和恒定污泥浓度下 SVI、平均粒径间的关系

对于公式 (1-8), 如果设定  $V'_0 = \alpha \frac{d_p^2}{SVI}$ , 则公式可变为:

$$V_s = V'_0 e^{-kX} \quad (1-14)$$

这跟经典的 Vesilind 公式结构是相同的。对于普通的絮状活性污泥系统来说, 由于污泥整体比较均一, 可以认为粒径确定, 则 Vesilind 公式就变成了考虑参数 SVI 的变形形式。Liu 等学者的研究表明, 采用公式 (1-8) 计算出的结果跟厌氧颗粒污泥的沉淀行为也符合的较好, 也可用于厌氧颗粒污泥沉淀行为的计算, 指导厌氧颗粒污泥反应器的设计和运行。

### 1.2.1.3 颗粒污泥的渗透性对沉淀的影响

颗粒污泥是一种多孔和不规则的聚集体。有学者研究发现, 当采用乳胶微球聚集体进行沉淀试验时, 其实际沉淀速率要比采用经典的 Stokes 公式计算出来的理论速率明显快, 而 Stokes 公式通常是假定微粒是刚性球体而且不具有渗透性。这也说明不规则的微球聚集体具有高度的可渗透性, 内含大量的微孔, 这些微孔是在形成球体的过程中更小的微颗粒单元之间聚集形成的。当微球聚集体沉淀的时候, 会有水流通过微球内部的微孔, 这能够降低水流对颗粒的阻滞作用, 因而其沉淀速率要比理论计算的高。

这种试验结果使人们很自然想到了颗粒污泥的沉淀行为。从微观特性上分析, 颗粒污泥也是一种多孔和不规则外形的聚集体, 只不过是由微生物之间聚集而形成的。如前文所述, 沉淀特性对生物处理系统有很大的影响, 良好的泥水分离效果是保证污水处理效果的

必要条件之一。从另一点上分析，颗粒污泥的渗透性也关系到污水处理过程中的传质行为，从而影响到微生物对水中污染物的降解。从形成上分析，颗粒污泥是由很多微生物通过自絮凝等作用形成的，其渗透性也不简单类似于乳胶形成的微球体，因为微生物的细胞之间存在黏性的胞外聚合物，这对其渗透性有一定的影响，因而其沉淀行为更加复杂。1.2.1.2 中计算颗粒污泥沉淀的方法考虑了粒径对其沉淀行为的影响，但并没有考虑到颗粒污泥的渗透性对沉淀行为的影响。目前有很多学者对颗粒污泥的沉淀和渗透性之间的关系进行了研究，取得了一系列的成果，下面对这部分内容进行简单的介绍

对于非渗透性的颗粒来讲，其在流体中的沉淀是一种由重力作用引起的自由沉淀过程，是重力和流体的阻力共同作用的结果，单个非渗透性颗粒的沉淀速率可用下面的 Stokes 公式来描述：

$$U_s = \left[ \frac{4g(\rho_a - \rho_l)d}{3\rho_l C_d} \right]^{1/2} \quad (1-15)$$

式中  $d$ ——颗粒的直径；

$\rho_a$  和  $\rho_l$ ——颗粒和流体的密度；

$g$ ——重力加速度常数；

$C_d$ ——经验阻滞系数，它是雷诺数的函数， $Re = \rho_l U d / \mu$ ，公式中

$U$ ——颗粒的实际沉淀速率；

$\mu$ ——流体的黏滞系数， $C_d$  可通过下面的公式计算：

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \quad (1-16)$$

对于一个微生物颗粒来讲，假定其中有  $N$  个确定的细胞，每个细胞的干重均为  $m_d$ ，当细胞内充满液体的时候，细胞的湿重为  $m_c$ ，湿密度为  $\rho_c$ 。整个球体颗粒的体积为  $V_a = \pi d^3 / 6$ ，其中总的细胞的体积为  $V_c = Nm_c / \rho_c$ ，则颗粒的孔隙率为  $\epsilon = 1 - V_c / V_a = 1 - (6Nm_c) / (\pi \rho_c d^3)$ 。水中颗粒中总的细胞重量  $Nm_c$  可用下面的公式计算： $Nm_c = Nfm_d = fW_d$ ，其中  $f$  是细胞的湿重和干重的比值，是无量纲的， $f = m_c / m_d$ ， $W_d$  是微生物颗粒的干重，这样，颗粒的孔隙率可用下面的公式来表示：

$$\epsilon = 1 - \frac{6fW_d}{\pi \rho_c d^3} \quad (1-17)$$

公式 (1-15) 中微生物颗粒和水的密度差可用  $\rho_a - \rho_l = (1 - \epsilon)(\rho_c - \rho_l)$  来计算，这样，公式 (1-15) 就变成如下形式：

$$U_s = \left[ \frac{8gf}{\pi} \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_c} \right) \frac{W_d}{C_d d^2} \right]^{1/2} \quad (1-18)$$

公式 (1-18) 中的细胞的湿密度  $\rho_c$  和细胞的湿重和干重的比值  $f$  都可以采用试验的方法来测定；微生物颗粒的干重  $W_d$  可以直接称量出来。

如果  $Re < 1$ ，则  $C_d$  可简化为  $C_d = 24/Re$ ，则公式 (1-18) 可以简化为：

$$U_s = \frac{gf(\rho_c - \rho_l)W_d}{3\pi\mu\rho_c d} \quad (1-19)$$

可以看出，公式 (1-19) 是典型的 Stokes 公式形式。

当颗粒污泥从水中沉向密度更大的流体时，其沉淀速率会下降。有学者设计了具有两个垂直圆筒的装置，里面分置不同密度的液体-水和另一种密度稍大的液体，来测定微生



物颗粒污泥的渗透特性。当颗粒污泥在两种溶液的交界面通过的时候，在颗粒内部微孔内含的原有的液体和颗粒外部包围的另一种流体之间会发生传质过程。假定这种传质很快可以达到平衡，则颗粒污泥在密度稍大的液体中 ( $\rho_l$ ) 和水中 ( $\rho_w$ ) 的沉淀速率的比值  $\Phi_s = U_{S(l)}/U_{S(w)}$  基于 Stokes 公式可以通过下面的公式来计算：

$$\Phi_s = \left[ \frac{(\rho_w C_{d(w)}) (\rho_c - \rho_l)}{(\rho_l C_{d(l)}) (\rho_c - \rho_w)} \right]^{1/2} \quad (1-20)$$

颗粒物（包括微生物颗粒）外形都是不规则的，有的研究者从分形几何的角度对颗粒污泥的外形特性也进行了一些研究，颗粒污泥的重量和外形间的关系可以表示如下：

$$W_c = f W_d \sim d^D \quad (1-21)$$

式中  $D$ ——分形维数，对于欧几里得几何结构体， $D=3$ ，而对于不规则的生物颗粒， $D<3$ 。

对于颗粒污泥来说，其分形维数的确定可以以颗粒尺寸的对数为 X 轴，以颗粒干重的对数为 Y 轴，做出一条直线，直线的斜率就是该颗粒的分形维数。Li 等学者在其研究中测得颗粒污泥的分形维数为  $2.09 \pm 0.42$ 。不规则的颗粒污泥通常有很多空隙，空隙的体积随着颗粒尺寸的增加也会增大，空隙的体积随着颗粒尺寸变化的关系为： $1 - \varepsilon \sim d^{D-3}$ 。

由于微生物颗粒污泥具有的多孔结构，使得颗粒内部也会存在明显的流体流动，这样会显著降低颗粒污泥的沉淀阻力，从而使得颗粒污泥的沉淀速度比通过 Stokes 公式理论计算出来的数值要大。通过 Stokes 公式计算出的理论沉淀速率  $U_s$  跟实际沉淀速率  $U$  相比，比值用  $\Gamma$  来表示，则  $\Gamma = U_s/U$ ，有的学者研究发现这个比值可以用如下的公式表示：

$$\Gamma = \frac{\xi}{\xi - \tanh(\xi)} + \frac{3}{2\xi^2} \quad (1-22)$$

公式中无量纲的渗透因子  $\xi$  是颗粒尺寸和水力渗透特性参数  $\kappa$  的函数，可以表示如下：

$$\xi = \frac{d}{2\sqrt{\kappa}} \quad (1-23)$$

通过设计精密的沉淀试验，比较理论计算沉淀速率和实际沉淀速率的比值，渗透因子  $\xi$  和水力渗透特性参数  $\kappa$  就可以被估算出来。颗粒内部的渗透性可以通过它的流体聚集效率值  $\eta$  更加直观的体现出来， $\eta$  定义为颗粒内部的流量和经过颗粒的总流量的比值。采用通过沉淀试验获得的渗透因子  $\xi$  的数值，颗粒污泥的流体聚集效率值  $\eta$  可以通过下式计算：

$$\eta = \frac{9[\xi - \tanh(\xi)]}{2\xi^3 + 3[\xi - \tanh(\xi)]} \quad (1-24)$$

基于以上的理论基础，有的学者通过设计一系列精密的颗粒沉淀试验，测定了颗粒污泥的流体力学性能，包括颗粒的沉淀速度和渗透特性等。试验中所采用的颗粒污泥粒径在 1.0~2.5mm 之间，取自实验室中的 SBR 反应器和一座实际污水处理厂。试验中采用双筒的垂直沉淀设备，在不同的筒中所注入的液体有所不同，这样通过测定颗粒的沉淀行为，通过理论计算，就可以获得颗粒的渗透特性和沉淀特性等一系列结果。试验结果表明微生物聚集的颗粒污泥具有高度的不规则性，其内部有较为发达的空隙。然而，试验测得的颗粒污泥在去离子水、EDTA 和 NaCl 溶液中的沉淀速度仅仅比通过 Stokes 公式计算出的刚性非渗透球体的沉淀速度有较小幅度的提高。对大多数的颗粒污泥来讲，通过试验测得的颗粒的流体聚集效率小于 0.10，这个数值比采用非生物颗粒，如乳胶小球测定的流