

| 水处理科学与技术·典藏版 21 |

序批式活性污泥法 原理与应用

杨 庆 彭永臻 编著

非外借



科学出版社

水处理科学与技术·典藏版 21

序批式活性污泥法原理与应用

杨 庆 彭永臻 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统论述了序批式活性污泥法(SBR)的原理,介绍了 SBR 工艺的实际应用情况,同时,还详细探讨了 SBR 法及其衍生工艺的基本原理与发展沿革、关键设备及其功能、设计方法等方面的内容,并配加了工程实例供读者参考。

本书可作为环境工程、环境科学、给水排水、环境微生物等专业技术人员的参考书,也可作为高等院校环境工程专业本科生或研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

水处理科学与技术:典藏版/曲久辉,任南琪,彭永臻,等编著.—北京:科学出版社,2017.1

ISBN 978-7-03-051235-2

I. ①水… II. ①曲… ②任… ③彭… III. ①水处理 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 305492 号

责任编辑:朱 丽 沈晓晶/责任校对:张怡君
责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2017 年 1 月第一次印刷 印张: 28 1/4

字数: 557 000

定价: 3980.00 元(全 25 册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

近年来,随着城市人口的集中和工农业的快速发展,我国的污水排放量日益增加,水污染问题日益严重,所以在对城市和工业污水处理的“量”提高要求的同时,城市和工业污水处理的“质”的问题也面临新的挑战:新建污水处理厂需要采用更加先进的工艺和设备,同时老厂进行升级改造的要求也日趋迫切。

序批式活性污泥(sequencing batch reactor, SBR)法是一种间歇式运行的活性污泥法污水处理工艺。由于它具有工艺流程简单、运行方式灵活、脱氮除磷效果好、可控性好等优点,已经成为中小城镇污水和工业废水的首选处理工艺。目前,国内 40%左右的中小城镇污水和 20%左右的工业废水处理都采用 SBR 法。但目前我国的 SBR 工艺污水处理厂普遍存在着能耗高、脱氮除磷效果不稳定等缺点。同时,国内尚没有一本论著系统地介绍 SBR 工艺的设备、设计方法和应用情况。因此出版一本关于 SBR 工艺运行、管理、控制、优化和设计方面的专著很有必要。

多年来作者长期致力于 SBR 工艺的研究和开发,围绕着 SBR 法的基础研究、技术研发、设备集成、推广应用等工作,先后参与完成了多项国家和省部级的科研项目。2009 年,作者及其团队主持的项目“SBR 法污水处理工艺与设备及实时控制技术”获得国家科技进步奖二等奖。本书是结合获奖项目及完成的国家自然科学基金重点项目、国家自然科学基金国际重大合作项目以及国家“863”项目等其他科研成果,并在参考了大量国内外文献的基础上最终形成的。通过阅读本书,不仅能够使一般的工程技术人员提高基本理论水平、理解 SBR 工艺,掌握 SBR 工艺的技能 and 解决问题的能力;而且可以使科研人员能够对 SBR 工艺的研究现状、前沿和应用情况有所了解,为今后的科研工作提供思路和参考。

全书共分为 6 章:第 1 章 SBR 法的基本原理与发展沿革,由污水处理技术的发展引出 SBR 法,介绍了 SBR 工艺的产生与发展沿革,并对 SBR 工艺的基本原理、流程、运行模式、优缺点进行了总结。第 2 章 SBR 法的关键设备及其功能,介绍了 SBR 工艺目前广泛应用的反应器构型、关键设备和附属设备,重点介绍了各种滗水器的原理、结构和应用情况。第 3 章 SBR 工艺设计,详细介绍了 SBR 工艺的 3 种设计方法,说明了设计方法的选择依据、厂址的选择和整体布置等方面的内容。第 4 章 SBR 法在污水处理工程中的应用,是本书的重点章节之一,主要介绍了 SBR 法在污水处理工程中的应用情况,包括 SBR 工艺在国内城市污水处理厂的应用情况,在本章中还分类别总结了 SBR 工艺在我国工业废水处理工程

中的应用情况, 以及 SBR 工艺在国外的应用情况。第 5 章 SBR 法各种衍生工艺的原理及应用, 选取了 10 种应用较为广泛的 SBR 衍生工艺进行了详细的介绍, 具体包括 ICEAS 工艺、CASS 工艺、两段 SBR 工艺(TSSBR)、DAT-IAT 工艺、UNITANK 工艺、MSBR 工艺、序批式生物膜工艺技术(SBBR)、厌氧 SBR 工艺(ASBR)、Unifed 及其他衍生工艺。主要介绍了各种衍生工艺的基本操作流程、工艺特点和应用情况。第 6 章 SBR 法污水处理厂的建设、调试与运行管理, 介绍了 SBR 工艺的工程施工方法, SBR 法污水处理厂的运行管理与调试方法以及常见故障和处理方案。通过以上内容的介绍, 以期为 SBR 工艺在更多污水处理厂中广泛推广提供有效的技术经验和科技支撑。

本书由北京工业大学环境与能源工程学院杨庆博士和彭永臻教授编著, 学术骨干张晶倩、刘秀红、王赛、李凌云、张静蓉、刘牡、唐旭光、马娟、王丽、黄惠君、李论、王燕、巩有奎、王中玮参加了相关课题研究并参与了著作的部分编辑校对与图表绘制工作, 在此深表谢意。多年来, 本课题的 40 余名博士和硕士研究生先后直接参加相关的科研工作, 发表学术论文和申报专利等, 为本书的出版作出了重要的贡献, 在此一并表示感谢。

感谢国家自然科学基金委员会、科技部、教育部、住建部、北京市科学技术委员会、北京市教育委员会、黑龙江省科学技术委员会、北京城市排水集团有限责任公司等单位与部门多年来的支持和帮助。

由于作者水平有限, 书中不足和错漏在所难免, 恳请读者批评指正。

编 者

2010 年 5 月于北京工业大学

目 录

前言

第 1 章 SBR 法的基本原理与发展沿革	1
引言	1
1.1 SBR 工艺的发展沿革	1
1.1.1 历史背景	1
1.1.2 SBR 工艺的产生与发展	4
1.2 SBR 法的基本原理与操作流程	8
1.2.1 SBR 法的基本运行模式及其原理	8
1.2.2 SBR 工艺的分类	11
1.3 SBR 工艺过程描述	13
1.3.1 概述	13
1.3.2 反应池水力学	17
1.3.3 过程选择	20
1.3.4 进水和曝气模式对种群动力学的影响	25
1.3.5 与连续流系统类比	26
1.4 SBR 工艺的特点	28
1.4.1 SBR 工艺的优点	28
1.4.2 SBR 工艺存在的问题	34
参考文献	41
第 2 章 SBR 法的关键设备及其功能	42
2.1 常见的 SBR 反应池构型	42
2.1.1 钢筋混凝土 SBR 反应池	43
2.1.2 Lipp 制罐技术在 SBR 法中的应用	44
2.1.3 拼装式 SBR 反应器	57
2.2 SBR 反应器的排水装置——滗水器	62
2.2.1 滗水器的作用、分类与特点	62
2.2.2 机械式滗水器	64
2.2.3 无动力滗水器	72

2.2.4	虹吸式滗水器	80
2.2.5	滗水器的水力学特征	85
2.2.6	滗水器的运行控制	92
2.2.7	滗水器的选型原则	94
2.2.8	滗水器的发展趋势	95
2.3	SBR 法的其他设备及其主要功能	96
2.3.1	空气扩散装置	96
2.3.2	潜水搅拌机	105
2.3.3	SBR 工艺过程参数的在线测量及变化规律	108
2.3.4	营养物传感器	119
2.3.5	SBR 工艺的自动控制系统	127
	参考文献	130
第 3 章	SBR 工艺设计	132
3.1	概述	132
3.1.1	SBR 工艺的适用条件及设计注意事项	132
3.1.2	SBR 工艺的常用设计方法	134
3.2	以去除有机物为目的的 SBR 设计——污泥负荷法	135
3.2.1	概述	135
3.2.2	设计参数的确定	137
3.2.3	周期时间及各工序时间的计算	137
3.2.4	反应池容积的计算	139
3.2.5	需氧量计算	139
3.2.6	剩余污泥量计算	140
3.2.7	设计举例	140
3.3	以硝化为目的的 SBR 设计——泥龄法	143
3.3.1	概述	143
3.3.2	设计污泥龄的确定	144
3.3.3	剩余污泥量的计算	145
3.3.4	污泥浓度的确定	146
3.3.5	生物反应池容积的确定	147
3.3.6	需氧量计算	147
3.3.7	设计举例	149
3.4	以脱氮为目的的设计——模型法	152
3.4.1	设计原理	152
3.4.2	工艺的选择	161

3.4.3 脱氮的一体化设计程序	162
3.4.4 前置反硝化 SBR 设计及设计举例	164
3.4.5 分段进水 SBR 设计及设计举例	168
3.4.6 交替缺氧/好氧 SBR 设计及设计举例	171
参考文献	172
第 4 章 SBR 法在污水处理工程中的应用	173
4.1 SBR 法在城市污水处理中的应用	173
4.1.1 城市污水的来源和性质	173
4.1.2 城市污水的排放标准	173
4.1.3 SBR 工艺处理城市污水的典型流程和设计参数	175
4.1.4 SBR 工艺的应用	176
4.1.5 SBR 工艺运行及应用存在的问题	178
4.1.6 SBR 工艺城市污水处理厂在我国各地区的应用实例	178
4.1.7 SBR 法处理城市污水的应用前景	194
4.2 SBR 法在工业废水处理中的应用	194
4.2.1 工业废水的特点与分类	195
4.2.2 SBR 法处理可生化性较好的高浓度有机废水	198
4.2.3 SBR 法在处理各种难降解废水中的应用概况	216
4.2.4 SBR 法在处理各种有毒废水中的应用概况	238
4.3 SBR 法在分散式小型生活污水处理中的应用	255
4.3.1 分散式污水处理与再利用(DESAR)基本概念	255
4.3.2 SBR 工艺在小型生活污水处理过程中的应用	259
4.4 SBR 工艺在国外的应用情况	260
4.4.1 SBR 工艺在澳大利亚的应用	261
4.4.2 SBR 工艺在美国和加拿大寒冷地区的应用	265
4.4.3 SBR 工艺在德国的发展	271
4.4.4 SBR 工艺在法国的应用情况	276
4.4.5 SBR 工艺在日本的应用情况	281
参考文献	286
第 5 章 SBR 法各种衍生工艺的原理及应用	291
引言	291
5.1 ICEAS 工艺原理及应用	291
5.1.1 工艺组成及运行模式	292
5.1.2 工艺去除污染物原理	293
5.1.3 ICEAS 工艺的控制系統	294

5.1.4	ICEAS 工艺的特点	295
5.1.5	改良型 ICEAS 工艺	296
5.1.6	ICEAS 工艺在国内外的应用及工程实例	298
5.2	CAST 工艺原理及应用	301
5.2.1	工艺组成及运行模式	302
5.2.2	工艺去除污染物的原理	303
5.2.3	工艺特点	305
5.2.4	CAST 的工艺设计及运行调控	309
5.2.5	CAST 工艺的应用	310
5.2.6	CAST 工艺的研究新进展	313
5.2.7	KDCAS 反应器	318
5.3	两段 SBR 工艺原理及应用	320
5.3.1	两段 SBR 工艺的基本操作流程	320
5.3.2	两段 SBR 工艺污染物去除机理	321
5.3.3	两段 SBR 工艺的特点	323
5.3.4	两段 SBR 工艺运行控制	324
5.3.5	两段 SBR 工艺在实际中的应用	329
5.4	DAT-IAT 工艺原理及应用	333
5.4.1	DAT-IAT 工艺的流程	333
5.4.2	DAT-IAT 工艺的特点	336
5.4.3	DAT-IAT 工艺设计计算	339
5.4.4	DAT-IAT 工艺的工程实例	343
5.5	UNITANK 工艺原理及应用	345
5.5.1	UNITANK 工艺的组成及运行模式	345
5.5.2	UNITANK 工艺去除污染物的原理	350
5.5.3	UNITANK 工艺的特点	351
5.5.4	主要工艺参数、设计要点、运行调控关键因素等	352
5.5.5	应用情况总结与工程实例	355
5.6	MSBR 工艺原理及应用	357
5.6.1	MSBR 工艺的组成与运行模式	358
5.6.2	MSBR 工艺去除污染物的原理	362
5.6.3	MSBR 工艺的特点	363
5.6.4	主要工艺参数、设计要点、运行调控关键因素等	364
5.6.5	MSBR 工艺的应用及工程实例	366
5.7	序批式生物膜技术	369

5.7.1	技术背景、基本流程及原理	369
5.7.2	SBBR 技术的特点	372
5.7.3	SBBR 工艺设计特点	373
5.7.4	SBBR 技术的应用	375
5.8	厌氧 SBR 工艺的原理及应用	378
5.8.1	ASBR 的基本运行模式及废水处理特性	379
5.8.2	ASBR 工艺的特点	380
5.8.3	影响 ASBR 处理效率的因素	382
5.8.4	ASBR 反应器在废水处理工程中的应用	383
5.9	UniFed [®] 原理及应用	386
5.9.1	UniFed [®] 工艺的产生	386
5.9.2	UniFed 工艺的基本流程	387
5.9.3	UniFed 系统除磷脱氮原理	389
5.9.4	UniFed [®] 工艺的空气堰	389
5.9.5	UniFed SBR 工艺在实际中的应用	391
5.10	其他衍生工艺	393
5.10.1	IDEA 工艺	393
5.10.2	LUCUS 工艺	394
5.10.3	AICS 工艺	394
5.10.4	CWSBR 工艺	395
	参考文献	397
第 6 章	SBR 法污水处理厂的建设、调试与运行管理	404
6.1	SBR 法污水处理厂的建设与工程施工	404
6.1.1	SBR 法污水处理厂建设的施工内容	404
6.1.2	SBR 处理工艺土建施工	404
6.1.3	工程验收	407
6.2	SBR 法污水处理厂的调试与运行管理	408
6.2.1	调试运转前的检查与准备	408
6.2.2	SBR 系统活性污泥的培养与驯化	409
6.2.3	试运行过程中主要运行参数的观测与调节	411
6.2.4	SBR 法污水处理厂常用设备与仪表的一般维护	415
6.2.5	SBR 法污水处理厂日常运行中的操作规程	423
6.3	SBR 法污水处理厂常见故障的处理方法	425
6.3.1	污泥膨胀	425
6.3.2	污泥上浮	432

6.3.3	污泥解体	432
6.3.4	泡沫问题	432
6.3.5	脱氮除磷效果不好	434
6.4	SBR 法能耗与能效分析	436
6.4.1	城市污水处理过程中节能措施	437
6.4.2	SBR 系统能耗分析及节能措施	439
	参考文献	442

第1章 SBR法的基本原理与发展沿革

引言

SBR (sequencing batch reactor)这个术语是 Irvine 于 1971 年在 PIWC(Purdue Industrial Waste Conference)上提出的^[1], 用来描述间歇运行的活性污泥周期工艺, 是专门为处理小流量与间歇排放的有机废水而设计的。该工艺的特征在于以进水、反应、沉淀、排水及闲置五个阶段为一周期的连续重复, 每个周期是根据它所处循环内的阶段和功能进行定义的。从此以后, SBR 这一术语被研究者及工程师们广泛采用。目前, SBR 工艺已广泛用于处理各种废水, 并产生了多种各具特色的衍生工艺, 包括 IDEA (intermittent decanted extended aeration)、ICEAS (intermittent cyclic extent aeration system)和 CASS(cyclic activated sludge system)等。SBR 技术的发展和被人们普遍接受, 应归功于学术机构、政府及生产企业三者的共同努力。随着 SBR 技术在全世界的应用与发展, 人们越来越热衷于讨论有关 SBR 理论与实际应用中存在的问题。1996 年国际水协会(International Water Association, IWA)在慕尼黑举行的第一届 SBR 专题会议(1th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor)促进了该技术的进一步发展及在世界范围内的推广应用, 此后每隔 4 年国际水协会都会举办 SBR 的专题讨论会, 到目前为止共举办了 4 次。2000 年 7 月第二届 SBR 专题会议在法国的纳博纳(Narbonne)举行, 2004 年 2 月第三届 SBR 专题会议在澳大利亚的努萨(Noosa)举行, 2008 年 3 月第四届 SBR 专题会议在意大利的罗马举行, 使得越来越多的人参与到 SBR 工艺研究与应用的讨论中。

1.1 SBR 工艺的发展沿革

1.1.1 历史背景

在 2007 年由 *British Medical Journal* 发起的评比中, 卫生设施的进步被评为过去 166 年中最伟大的医疗进步^[2]。在这一百余年发展历程中, 污水处理的理论和有了巨大的发展, 污水生物处理技术经历了三个发展阶段(图 1-1):

第一阶段, 在污水生物处理初期, 人们意识到有机污染对环境生态的危害, 从而把可降解有机物(BOD)和悬浮固体(SS)的去除作为污水处理技术的主要目标。

第二阶段, 到 20 世纪 60~70 年代, 随着常规二级生物处理技术在工业化国家

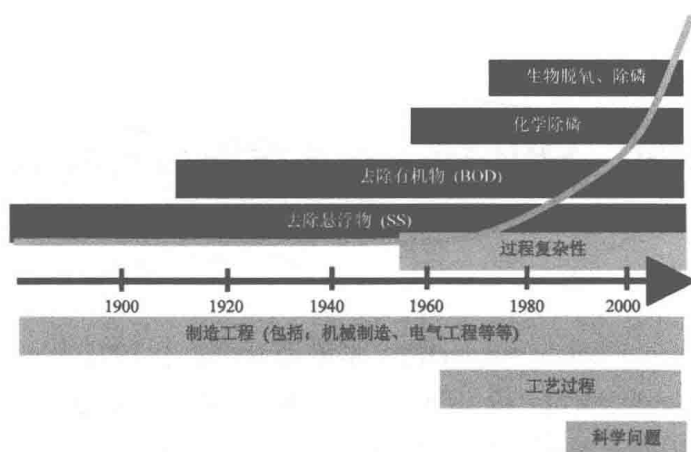


图 1-1 污水处理技术的发展

的普及，人们发现仅去除 BOD 和 SS 是不够的，氨氮和磷的存在将使水体发生富营养化，这一问题的出现使常规二级生物处理从单纯的有机物的去除发展到有机物和氨氮的联合去除，即污水的硝化处理。

第三阶段，20 世纪下半叶，地表水的富营养化问题凸显出来。富营养化表现为由于排放入河流的氮(N)和磷(P)引起的藻类及其他水生植物大规模的爆发。到 60 年代人们已清晰地意识到为了限制富营养化必须去除污水中的氮、磷。污水氮、磷去除的实际需要使二级生物处理技术进入了具有除磷脱氮功能的二级生物处理阶段。现代的城市污水处理厂的处理对象，不仅包括 COD、BOD 和 SS，还有氮、磷等营养物质，这就要求在同一个污水处理系统中同时具备多种功能。

20 世纪 70 年代以前，污水处理主要是去除水中的悬浮物、有机物、降低色度，因而主要采取传统的活性污泥法和生物膜法，可以降解有机污染物，去除 BOD、COD 和 SS 等，但不具备脱氮、除磷的功能。80 年代以后，随着一些缓流河道、海湾、湖泊发生富营养化，大量水体功能严重丧失，氮、磷营养元素对环境的威胁越来越大，必须对废水中的氮、磷进行控制，从而推动水污染治理技术进一步发展。在传统的活性污泥法和生物膜法等污水处理技术的基础上，发展了以 A/O、A²O 等为代表的脱氮、除磷工艺，从而满足了对氮、磷指标的控制要求。

活性污泥法于 1914 年首先在英国应用，在污水处理技术方面目前应用最多的仍是传统的活性污泥法及其变形工艺，如 A/O、A²/O、SBR、氧化沟等。在 SBR 法出现的初期，由于受到理论水平和运行、管理特别是自动控制水平等技术条件的限制，其应用和推广工作进展缓慢。近 30 多年来，随着对其生物反应和净化机理研究的广泛深入，该法在生产应用技术上不断改进和完善，得到了迅速发展，相继出现了多种工艺方法，使得该法的应用范围逐渐扩大，处理效果不断提高，工艺设计和运行管理更加科学化。目前，SBR 法已经成为城市污水、有机工业废

水的有效处理方法。

几十年来,人们对普通活性污泥法(或称传统活性污泥法)进行了许多工艺方面的改革和净化功能方面的研究。在污泥负荷率方面,按照污泥负荷率的高低,可以分成低负荷率法、常负荷率法和高负荷率法;在进水点位置方面,出现了多点进水和中间进水的阶段曝气法、生物吸附法、污泥再曝气法;在曝气池混合特征方面,改革了传统法的推流式,采用了完全混合法;为了提高溶解氧的浓度、氧的利用率和节省空气量,研究了渐减曝气法、纯氧曝气法和深井曝气法。

近十多年来,为了提高进水有机物浓度的承受能力、提高污水处理的效能,强化和扩大活性污泥法的净化功能,人们又研究开发了两段活性污泥法、粉末炭活性污泥法、加压曝气法等处理工艺;开展了脱氮、除磷等方面的研究与实践,采用化学法与活性污泥法相结合的处理方法;对净化含难降解有机物污水等方面也进行了探索。目前,活性污泥法正在朝着快速、高效、低耗等多方面发展。

新工艺、新技术的发展,除了有其本身发展的规律,还要顺应客观的需求背景^[3],如:

(1) 城市污水处理厂发展的趋势,当前是朝小型(或中小型)化、分散化方向发展。它不像几十年前朝向大型化、超大型化发展,许多处理能力达 $40 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 乃至 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 级别的城市污水处理厂到处拔地而起,基建费用的投入极为惊人,运行管理十分复杂,净化水的出路也受到极大限制。在这种情况下,污水处理厂转向中小型化、分散化发展,一如几十年前的初期发展阶段,遍地开花。这种在新条件下回归初始,正如 SBR 法的再生一样,体现了事物的发展规律。污水处理厂的中小型化、分散化反映了高新技术的发展,以及人们掌握高新技术能力的提高与技术的普及化。净化出水易于就地分散回用与处置,基建投资易于筹措,运行管理简易可行。而且,随着人们对生态环境的要求不断提高,住宅区也趋向分散化、农村化发展。在这种背景下,城市污水处理厂的发展也趋向于小型(中小型)化和分散化,由此产生了对相应适宜的工艺流程的工艺技术的需求,SBR 法的应运而生反映了这种客观需要。

(2) 过去污染控制重点在于有机污染物的去除,而如今为了防止湖泊、河口、海湾等缓流水体富营养化,污水排放标准对出水水质中如氮、磷等的排放要求越来越严格,控制要求越来越高。在此情况下,开发出既能高效去除 BOD、COD,又能高效脱氮、除磷的工艺技术备受关注,SBR 法在改进后能够满足这方面的要求,它技术可靠,出水水质良好。

(3) 中小型污水处理厂操作灵活方便,具有去除 BOD、COD、氮、磷等综合功能,占地面积小,而 SBR 法能符合此类要求。

(4) 电子计算机的广泛应用,促进了 SBR 反应池的曝气、污泥回流等的自动控制技术的进步以及相应软件技术的开发应用,使 SBR 法日趋完善和成熟。

(5) DO 计、pH 计、ORP 计、水位计、电气动阀门等工艺过程监控所需的仪器仪表日益完善,且在经济上可以承受, SBR 法在这些仪器仪表装备下如虎添翼,技术上日益精细可靠。

1.1.2 SBR 工艺的产生与发展

活性污泥法的产生可以追溯到 19 世纪。活性污泥法产生于美国和英国,是通过一个简单的试验被发现的。1882 年, Angus Smith 进行了向污水中鼓入空气的试验,开始了采用曝气的方法处理污水的最初尝试。起初,他们在装有废水的容器中曝气,希望氧气将废水中的污染物氧化,但由于容器内缺乏足够的微生物而导致试验失败。1884 年, Dupre 和 Dibdin 对生活污水进行了曝气试验,试验表明,曝气对污水的处理效果几乎没有作用。1893 年, Mather 和 Platt 通过试验发现,如果曝气池存在一定量的“沉积物”,污水的处理效果将会得到显著提高。同年, Fuller 在 Lawrence 试验站的早期研究中,采用较大的颗粒填料制成的过滤器研究了曝气量对生活污水处理效果的影响。1897 年, Fowler 在试验过程中获得了非常清澈的出水,并且“沉积物”可以迅速沉降。到 1910 年,对含有“生物腐殖质”和“烂泥”的废水曝气,引起了广泛的关注。1912 年,在英格兰的曼彻斯特, Fowler 采用曝气的方法处理反应池内的污水,曝气后的污水进入沉淀池进行沉淀,以获得澄清的出水。曝气池内最初的“烂泥”是从一个池塘收集的,由于二沉池没有设置污泥回流系统,需要不断地从池塘收集新的“烂泥”加入曝气池中,以维持一定的污泥浓度。

1914 年, Fowler 的两个学生 Arden 和 Lockett,采用一个间歇式运行的城市污水处理系统进行试验,为了获得较高的污泥浓度,对在每个周期曝气阶段积累的腐殖质或沉淀物,不进行排放。经过一段时间的运行,获得了现在被人们称为“活性污泥”的微生物絮体。他们的试验过程描述如下:首先采用曼彻斯特城市的生活污水,在 80 盎司(约 2.4L)的容器内进行曝气试验,每个运行周期直至硝化完成后才停止曝气。第一次试验大约进行了 5 周的连续曝气,硝化反应才完成,然后沉淀、仅排掉清澈的上清液,沉淀物保留在容器内。然后重新加入原水,此时污水和容器内第一周期的沉淀物充分接触,随后进行曝气直至硝化反应充分完成。此后,他们多次重复这种运行方式。试验结果清楚地表明:随着容器内沉淀物的增加,有机物完全氧化的时间逐渐减少。最后,仅需要 24h 便可完全氧化一个周期注入的新鲜原水。Arden 和 Lockett 将反应过程中形成的沉淀物命名为“活性污泥”。同年 5 月,他们在英国化学工业学会议上,在论文“无需滤池的污水氧化试验”中报道了其研究成果。在活性污泥法发展的历史上将 1914 年作为活性污泥法的创始年。

在活性污泥法的发展史上, Arden 和 Lockett 的发现具有里程碑式的意义,其

重要性可以归结为六个方面,其中与 SBR 系统最为相关的是以下两方面:

(1) 为了维持反应器内活性污泥始终处于最高效率的“工作状态”,在任何时候系统内都不应使未被氧化的颗粒状污染物得到积累。

(2) 如果仅通过适宜的曝气量来维持污泥的活性,那么就应该使反应器内的污水与活性污泥充分接触。

20 世纪初,活性污泥法逐渐得到推广应用,并在随后的多年里一直作为污水处理的主流技术。活性污泥法最初的研究采用的是充排式反应器,即 SBR 法。但在随后的实际应用中,一些技术问题在当时条件下尚无妥善解决的办法,于是改用了推流式连续流系统,即所谓的传统活性污泥法,并形成了相当规范的工艺流程:以曝气池为主体工艺,与格栅、沉砂池、初沉池、二沉池、污泥回流泵及污泥处理等构筑物和设备共同组成完整的工艺流程。

采用 SBR 工艺处理曼彻斯特市的生活污水,曝气 6~9h(保持活性污泥与污水的充分接触),便可获得较好的出水水质。检测结果表明, SBR 工艺对生活污水中污染物的去除率与生物滤池相当, SBR 工艺的曝气时间长短主要取决于污水中的污染物浓度和所要求的污染物去除率。

1914~1920 年, Ardern 和 Lockett 的试验结果在实际工程中被迅速、广泛地应用,在英格兰共建造了 4 个实际规模的 SBR 污水处理系统,具体如下:

1914 年,在索尔福德建造了一个采用扩散曝气的 $300\text{m}^3/\text{d}$ 污水处理系统。

1916 年,在谢菲尔德建造了一个采用扩散曝气和机械曝气的 $3000\text{m}^3/\text{d}$ 污水处理系统。

1916 年,在伍斯特建造了一个采用扩散曝气的 $7570\text{m}^3/\text{d}$ 污水处理系统。

1920 年,在滕斯托尔建造了一个采用机械曝气的 $3100\text{m}^3/\text{d}$ 污水处理系统。

上述建造的 4 个污水处理系统,在设计时均采用阶段进水的方式。这与 Ardern 和 Lockett 的最初试验中所采用的进水方式不一致(最初的实验采用瞬时进水方式)。此外,在制定 4 个污水处理系统的运行方案时,召开了一个关于进水、曝气和沉淀阶段的先后顺序的会议。然而,此次会议最重要的一点是讨论并确定了 SBR 系统的一些常规参数值。一般来说, SBR 系统参数具体如下:沉淀时间为 2h;曝气反应时间取决于每天的进水次数;体积交换比(VER)为 3:1;静沉 2h 后的污泥体积应少于最高设计水位时反应池容积的 20%。系统所设定的体积交换比(3:1)在实际污水处理的 SBR 系统中被认为是较高的。但是如果系统采用瞬时进水—曝气反应—沉淀排水的运行策略,这个体积交换比也可以采用。虽然上述运行策略通常用于序批式试验而非实际的污水处理厂,但是可以有效地抑制丝状菌膨胀,并有助于形成沉降性良好的活性污泥。Ardern 和 Lockett 通过大量的试验认为,如果从实际应用角度考虑,为了使活性污泥易于沉降,那么对于一个 SBR 系统,污泥和污水的体积比最好不超过 1:1。

此外，Arderm 和 Lockett 对 SBR 系统的工艺参数、影响因素等都进行了大量的试验研究。然后基于大量的试验数据和对 SBR 系统的深入理解，建立了 SBR 系统的运行方案，如表 1-1 所示。然而，在众多的影响因素中，曝气量对 SBR 系统的脱氮性能具有重要的影响。他们首次发现了同步硝化反硝化(simultaneous nitrification and denitrification)现象，并且明确了同步硝化反硝化的定义。此外，基于 SBR 系统的同步硝化反硝化现象，考察了曝气强度对系统氮平衡的影响。试验表明：曝气强度是影响系统氮平衡的重要因素之一。最后，他们还将氨去除效率与曝气时间、污泥量三者有机联系起来。并且认为，采用活性较好的污泥，在不增加总曝气费用的前提下，可以获得较为理想的出水水质。

表 1-1 Arderm 和 Lockett 提出的典型运行方案

运行过程	污泥体积为 20%的情况/min	污泥体积为 40%的情况/min
进水	60	40
反应	240	120
沉淀	120	120
排水	60	40

1915 年，在美国密尔沃基(威斯康星州)，建成了世界上第一座 SBR 工艺的污水处理厂。该污水处理厂的工艺参数如下：周期时间为 6h，其中，进水 60min，曝气反应 210min，沉淀 30min，排水 60min。在 1915~1916 年间，在美国的布鲁克兰(纽约州)、芝加哥(伊利诺斯州)、克利夫兰(俄亥俄州)和休斯敦(得克萨斯州)等地进行了一系列的 SBR 系统处理城市污水的试验研究。

在 1915~1916 年间，美国建造了一大批采用 SBR 工艺的污水处理厂，并且该污水工艺的优势也非常明显。1923 年，O'Shaughnessy 的研究发现，分别采用连续流系统和 SBR 系统处理相同的城市污水，在达到相同净化效率的同时，前者所需的时间是后者的两倍。然而事实上，在 1914~1920 年间，几乎所有采用 SBR 系统的污水处理厂全部被改造成了连续流污水处理系统。

Arderm 针对这一现象进行了深入的分析，认为以下三方面是导致这一现象的本质原因：①排水阶段能量浪费较大(与进水流速相比，排水流速较大)；②由于活性污泥黏附于大气泡空气扩散器上，从而容易导致空气扩散器的堵塞；③由于需要进行多个开关阀门的转换及空气扩散器的清洗，操作者需要始终保持较高的注意力。Arderm 提出了解决上述问题相应的办法，即采用多个反应池的 SBR 系统、改进曝气设备及采用自动控制系统等。尽管这些措施能够十分有效地解决上述问题，但是由于自动控制技术的落后，严重制约了 SBR 法在污水处理系统中的应用。

美国直到 20 世纪 40 年代后期，欧洲直到 1959 年，伴随着自动控制技术的日