

徐州工程学院学术著作出版资金资助出版
国家星火计划项目（项目编号：2012GA690325）

复合式膜生物反应器的 运行特性与膜污染控制原理

刘 强 / 著

Fuheshi Mo Shengwu Fanyingqi De

Yunxing Tearing Yu Mo Wuran Kongzhi Yuanli

中国矿业大学出版社

徐州工程学院学术著作出版资金资助出版
国家星火计划项目(项目编号:2012GA690325)

复合式膜生物反应器的运行特性 与膜污染控制原理

刘 强 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

在普通的膜生物反应器(CMBR)内安装生物填料,运行一段时间后,反应器内会同时具有悬浮性微生物(活性污泥)和附着性微生物(生物膜),此时的反应器称为复合式膜生物反应器(HMBR)。采用HMBR处理城市生活污水,将处理结果与CMBR进行对比,对HMBR的运行特性与膜污染控制原理进行研究。试验结果表明,HMBR能够有效去除有机物及营养物质,对COD、BOD₅、NH₃-N、TN和TP的去除率分别为94.2%、98.5%、97.2%、51%和81.5%,比CMBR分别提高了3.8%、3.8%、4.2%、13.7%和1.7%。另外,HMBR还能够有效控制膜污染,当跨膜压差(TMP)达到20 kPa时,CMBR仅运行了57 d,而HMBR则运行了143 d。HMBR对膜污染的控制是通过去除胞外多聚物(EPS)来实现的。EPS可分为溶解性EPS和附着性EPS,后者又可细分为松散附着性EPS(LB-EPS)和紧密附着性EPS(TB-EPS)。B-EPS直接影响活性污泥的各项物理性能,随着其浓度的降低,活性污泥的絮凝和沉淀性能均有所提高,粒径明显增大,絮体结构趋于密实。与TB-EPS相比,LB-EPS含量对污泥相关物理性质的影响更为明显。经过相同运行时间后对HMBR和CMBR的滤饼层阻力 R_c 进行的测定结果表明,前者仅为后者的43%。由此推断,通过对B-EPS的去除以改善活性污泥的相关物理性质,进而减缓滤饼层阻力的增长速度是HMBR有效控制膜污染的重要原因。对于S-EPS,可认为在HMBR运行条件下其浓度的降低对滤饼层阻力的影响不大,而主要是减缓了膜孔阻力 R_0 的增长速度(经过相同运行时间后HMBR膜孔阻力的实测结果为CMBR的56%),这是HMBR能够有效控制膜污染的另一个重要原因。

图书在版编目(CIP)数据

复合式膜生物反应器的运行特性与膜污染控制原理/
刘强著. —徐州:中国矿业大学出版社,2015.6

ISBN 978-7-5646-2740-9

I. ①复… II. ①刘… III. ①生物膜反应器—研究
IV. ①X7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第149602号

书 名 复合式膜生物反应器的运行特性与膜污染控制原理
著 者 刘 强
责任编辑 褚建萍
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 10 字数 195千字
版次印次 2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷
定 价 39.50元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

《2014 中国环境状况公报》表明,2014 年我国的水污染防治工作继续积极推进。对重点流域水污染防治规划实施情况进行考核,对未通过考核的地方政府负责人进行约谈,并实施区域环评限批;经国务院同意,环境保护部等部门印发了《水质较好湖泊生态环境保护总体规划(2013—2020 年)》;中央财政安排专项资金 55 亿元,支持 55 个水质较好湖泊的保护;住房和城乡建设部、国家发展改革委员会积极推进城市节水,水利部、国土资源部启动国家地下水监测工程。随着上述一系列措施的实施,我国的水污染防治工作取得了很大的成效。截至 2014 年年底,全国设市城市污水处理厂达 1 797 座,污水处理能力为 1.31 亿立方米/日,同比增长 611 万立方米/日。全国城市污水处理厂累计处理污水 382.7 亿立方米,同比上升 5.9%,城市污水处理率达到 90.2%。对农村污水的治理工作也取得了一定的进展,对生活污水进行处理的行政村为 5.5 万个,占行政村总量的 10.0%,同比上升 0.9%;农村投入污水处理的资金达到 63.8 亿元。

然而不可否认的是,目前我国的水污染防治工作形势仍然非常严峻,仍有大量的污水未经有效处理便直接排入天然水体,这种情况在农村地区尤为严重。数据表明,2014 年,长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河等七大流域和浙闽片河流、西北诸河、西南诸河仍存在不同程度的污染。

此外,在水资源日益紧张的今天,大量污水未经有效利用便直接排放也会造成水资源的巨大浪费。因此,越来越多的专家开始致力于污水再生利用技术的研究。

膜生物反应器(MBR)是一种新型高效的污水再生利用技术。该技术的发展虽然仅有 50 多年的历史,但是由于其具有处理效率高、出水水质好、占地面积小、剩余污泥少等优点,已受到很多水处理工作者的重视,在生活污水和工业废水的处理中均有较广泛的应用。但是,膜污染的问题极大地迟滞了该技术的应用进程。目前,对 MBR 的研究热点和难点仍然主要集中在膜污染机理及其控制措施上。本书介绍了一种在曝气池中同时具有活性污泥和生物膜的新型 MBR——复合式 MBR(HMBR),采用 HMBR 处理农村生活污水,对其处理效果及膜污染控制情况进行了研究,同时从胞外聚合物(EPS)的角度对其膜污染控制原理进行了研究,希望能够有助于更深入地了解 MBR 的膜污染过程,同时

也为 MBR 的膜污染控制提供新的思路,进一步推动 MBR 的应用进程。

本书的出版得到了国家星火计划项目(2012GA690325)和徐州工程学院学术著作出版基金的共同资助,在此表示感谢!

由于作者本人水平有限,书中某些观点和认识可能有失偏颇,缺点甚至谬误也在所难免,在此诚恳希望得到读者的批评指正。

作 者

2015 年 3 月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 MBR 技术原理	1
1.3 MBR 的发展概况	2
1.3.1 MBR 在国外的概况	2
1.3.2 MBR 在国内的概况	4
1.4 MBR 的分类	5
1.4.1 按反应器的构造方式分类	5
1.4.2 按膜组件性质分类	8
1.4.3 按生物降解类型分类	8
1.5 MBR 的优点	8
1.5.1 污染物去除特性	8
1.5.2 抗冲击负荷特性	9
1.5.3 操作运行特点	9
1.6 MBR 的缺陷——膜污染	10
1.6.1 膜污染的定义	10
1.6.2 膜污染的成因	11
1.6.3 膜污染的控制措施	13
1.6.4 膜污染后的清洗	14
1.7 MBR 的应用现状	15
1.7.1 日本	15
1.7.2 欧洲	15
1.7.3 北美	16
1.7.4 主要生产厂家的	17
1.8 MBR 的研究进展	19
1.8.1 研究者的地理分布	20
1.8.2 期刊论文的数量	20

1.8.3	主要研究内容	20
1.8.4	使用最多的工艺类型	21
1.8.5	最新研究热点	21
1.9	课题来源、研究目的及主要研究内容	22
1.9.1	课题来源	22
1.9.2	研究目的及意义	22
1.9.3	主要研究内容	23
2	试验材料与方法	25
2.1	原水水质	25
2.2	试验装置	26
2.2.1	试验装置	26
2.2.2	膜组件	26
2.2.3	生物填料	28
2.3	CMBR 和 HMBR 的工艺参数	28
2.4	试验方法	29
2.5	检测项目及方法	29
2.5.1	水质参数	29
2.5.2	EPS 的提取与检测	30
2.5.3	活性污泥絮体的絮凝及沉淀性能	31
2.5.4	污泥絮体形态	31
2.5.5	微生物种类	31
2.5.6	滤饼层比阻	31
2.5.7	活性污泥粒径分布	32
2.5.8	膜表面污染情况	32
2.5.9	微生物群落结构	32
2.5.10	各种膜阻力	32
3	HMBR 的污染物去除特性	34
3.1	试验条件	34
3.1.1	原水水质	34
3.1.2	工艺参数	34
3.2	污染物去除特性	35

3.2.1	生物量的变化	35
3.2.2	有机物的去除	35
3.2.3	$\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除	39
3.2.4	TN 的去除	39
3.2.5	TP 的去除	40
3.2.6	浊度的去除	42
3.2.7	色度的去除	42
3.3	TMP 的变化趋势	43
3.4	微生物特性	44
3.4.1	生物多样性	44
3.4.2	细菌	44
3.4.3	原生动物	45
3.4.4	后生动物	48
3.5	小结	49
4	EPS 分析及 HMBR 的膜污染控制原理	51
4.1	EPS 分析	51
4.1.1	试验材料	52
4.1.2	S-EPS、LB-EPS 和 TB-EPS 的提取	52
4.1.3	S-EPS、LB-EPS 和 TB-EPS 的检测	53
4.1.4	结果与分析	54
4.2	HMBR 的脱氮机理	57
4.2.1	原水水质	57
4.2.2	反应器工艺参数	58
4.2.3	CMBR 与 HMBR 中的 B-EPS 含量及其对活性污泥特性的影响	58
4.2.4	CMBR 与 HMBR 中活性污泥的粒径分布	59
4.2.5	HMBR 中的活性污泥絮体结构	59
4.2.6	HMBR 的脱氮效果	61
4.2.7	HMBR 的脱氮机理	61
4.3	HMBR 的膜污染控制原理	65
4.3.1	原水水质	65
4.3.2	反应器工艺参数	65

4.3.3	CMBR 与 HMBR 的 EPS 分布	65
4.3.4	LB-EPS 和 TB-EPS 对活性污泥絮凝及沉淀性能的影响	66
4.3.5	LB-EPS 中各组分与活性污泥絮凝及沉淀性能的关系	67
4.3.6	CMBR 与 HMBR 中活性污泥的絮凝及沉淀性能	70
4.3.7	CMBR 与 HMBR 内污泥颗粒的粒径分布	70
4.3.8	CMBR 与 HMBR 中的滤饼层比阻	70
4.3.9	CMBR 与 HMBR 的膜污染状况	72
4.3.10	CMBR 与 HMBR 中的膜阻力	73
4.3.11	HMBR 的膜污染控制原理	73
4.4	小结	91
5	HMBR 的滤饼层阻力模型及其应用	92
5.1	微孔膜分离技术的基本原理和特点	92
5.1.1	微滤膜的特点	92
5.1.2	微滤膜的分离机理	94
5.2	几种常见的膜污染动力学模型	96
5.2.1	膜过滤阻力的分类及特点	96
5.2.2	膜通量随时间变化的经典模型	99
5.2.3	层流模型	100
5.3	错流过滤条件下的膜污染过程	101
5.4	HMBR 滤饼层阻力模型的建立	102
5.4.1	滤饼层阻力模型的建立	102
5.4.2	模型参数的确定	104
5.5	模型计算	106
5.6	小结	106
6	不同 HRT 条件下 HMBR 处理生活污水的效能研究	108
6.1	材料与amp;方法	108
6.1.1	试验装置	108
6.1.2	原水水质	109
6.1.3	试验方法	109
6.1.4	检测项目及方法	109

6.2	结果与讨论	110
6.2.1	HRT 对处理效果的影响	110
6.2.2	HRT 对活性污泥物理性能的影响	112
6.2.3	TMP 的变化情况	112
6.3	结论	113
7	HMBR 处理奎河水的效能研究	114
7.1	材料与amp;方法	114
7.1.1	试验装置	114
7.1.2	原水水质	114
7.1.3	试验方法	115
7.1.4	检测项目及方法	115
7.2	结果与amp;讨论	116
7.2.1	对有机物的去除效果	116
7.2.2	对 NH ₃ -N 的去除效果	117
7.2.3	对 TN 的去除效果	117
7.2.4	对 TP 的去除效果	118
7.2.5	对浊度和色度的去除效果	118
7.3	结论	119
8	HMBR 的技术经济分析	120
8.1	HMBR 的技术可行性分析	120
8.1.1	污水回用标准	120
8.1.2	HMBR 出水水质	120
8.1.3	HMBR 出水水质等级的判定	121
8.1.4	CMBR 和 HMBR 出水水质的比较	126
8.2	HMBR 的经济可行性分析	129
8.2.1	HMBR 的工程建设费用	129
8.2.2	HMBR 的运行费用	131
8.2.3	HMBR 的制水成本	131
8.2.4	HMBR 的经济效益	131
8.2.5	HMBR 的综合经济分析	132
8.3	小结	132

9 结论与建议	133
9.1 结论	133
9.2 建议	134
参考文献	135

1 绪论

1.1 引言

城市污水的处理多年来一直采用活性污泥法^[1],该工艺通过对曝气池中的微生物进行人工强化培养而提高其对污染物的生物降解能力^[2]。

对于敞开式的曝气池,在运行过程中经常会产生难闻的臭味,因此污水处理设施一般都建在离城市较远的地方,这就相应地增加了污水管网的建设和维护费用;活性污泥法的出水水质受活性污泥沉淀性能的影响极大,如果活性污泥的密度与水接近,那么活性污泥就难以沉淀,难以快速地实现固液分离,出水水质就会受到影响;由于受自身沉淀性能的影响,活性污泥的浓度一般为 $5\sim 8\text{ g/L}$ ^[3],因此,曝气池的面积一般都比较较大;另外,采用活性污泥法会产生大量的剩余污泥,这些剩余污泥的处理和处置费用较高,大约占总成本的 50% ^[1]。鉴于此,活性污泥法在技术上亟须创新。

近年来,随着膜生产成本的逐渐降低,膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)作为一种新型高效的污水处理技术在世界范围内引起了人们广泛的关注。

1.2 MBR 技术原理

MBR 主要由膜组件和生物反应器两部分构成。大量微生物(活性污泥)在生物反应器内与基质(废水中的可降解有机物等)充分接触,通过氧化分解作用进行新陈代谢以维持自身生长及繁殖,同时使有机污染物降解。膜组件通过机械筛分、截留等作用对废水和污泥混合液进行固液分离。大分子物质等被浓缩后返回到生物反应器中,从而避免了微生物的流失。生物处理系统和膜组件的有机组合,不仅提高了系统的出水水质和运行稳定性,还延长了难降解大分子物质在生物反应器内的水力停留时间,从而提高了系统对难降解物质的去除效果^[4,5]。

1.3 MBR 的发展概况

1.3.1 MBR 在国外的的发展概况

MBR 是随着超滤技术的深入研究和发 展而在污水处理领域得到新的开发和利用的,这项技术最早起源于 20 世纪 60 年代的美国。

MBR 在污水处理方面的研究与应用可以分为三个阶段。

1.3.1.1 第一阶段(1966~1980 年)

1966 年,美国 Dorr-Oliver 公司的 Smith 等人第一次报道了将膜与生物反应器相结合以处理城市污水的方法^[6,7]。该工艺采用一个外部循环的板框式组件来实现膜过滤,出水 BOD 小于 1 mg/L,出水 COD 为 20~30 mg/L,系统处理能力为 10~100 m³/d。该项研究的目的在于开发一种比传统活性污泥法结构更为紧凑、出水水质更好的处理工艺。

Dorr-Oliver 公司在 20 世纪 60 年代还开发出了另一种膜处理工艺 MST(membrane sewage treatment)。在该系统中,污水进入悬浮生长的生物反应器内,通过超滤膜组件的抽吸作用而达到连续出水^[8,9]。

1968 年,Smith 进行了使用活性污泥法与超滤膜相结合的 MBR 处理城市污水的研究。1969 年,Budd 等人的分离式 MBR 获得美国专利,这可作为 MBR 用于水处理的标志。1970 年,Hardt 等人采用好氧生物反应器处理合成废水,流程中用一个死端超滤膜来实现泥水分离,反应器中的 MLSS 浓度高达 30 000 mg/L,膜通量为 7.5 L/(m²·h),COD 去除率为 98%。1971 年,Bemberis 等人一座实际的污水处理厂进行了 MBR 的试验,取得了良好的效果。70 年代初期,在好氧分离式 MBR 的研究进一步扩大的同时,厌氧 MBR 的研究也在相继进行。1972 年,Shelf 等人进行了厌氧 MBR 的试验研究;1974 年,Cruver 等人进行了厌氧 MBR 的中试研究;1977 年,Arika 等人进行了 MBR 的研究,发现用超滤膜代替二沉池可以有效防止污泥膨胀对出水水质的影响,同时发现较高的污泥浓度有较高的耐冲击负荷能力;1978 年,Grethlein 等人进行了厌氧消化池—膜系统处理生活污水的研究,结果表明,反应器对 BOD、NO_x 的去除率分别为 90%和 75%;Hammer(1969)和 Li(1984)等人分别进行了厌氧—膜系统操作的可行性研究,结果表明,厌氧污泥的沉淀性能较差,若想获得高浓度的污泥,提高污泥龄是关键。

这一时期的膜由于受生产技术的限制,渗透通量较小,使用寿命较短,MBR 未能在北美得到商业化应用。

1.3.1.2 第二阶段(1980~1990年)

进入 20 世纪 80 年代以后,随着新型膜材料的相继开发、膜制造技术的不断进步以及膜清洗方法的不断改进,MBR 的研究有了很大的进展^[10],一些公司成功地使自己的 MBR 进入了商业化应用^[11]。

日本国土面积较小,地表水体径流距离较短而导致其自净能力较差,生态系统脆弱,易受到污染。MBR 由于占地面积较小且出水水质优良,得到了日本 Sanki Engineering 的应用许可。自 1983 年至 1987 年,日本相继有 13 家公司使用好氧 MBR 处理大楼污水,处理能力为 50~250 m³/d,出水作为中水回用。自 1985 年至 1990 年,日本建设省制定了“*Aqua Renaissance*’ 90”研究计划,该计划耗资总额高达 118 亿日元,目的是把高技术应用于水处理。从高效、节能的角度出发,通过小试、中试,最后进入到生产性试验,研制出了处理 7 类污水的 MBR 系统,其中包括酒精发酵废水处理系统(5 m³/d)、淀粉厂废水处理系统(5 m³/d)、造纸厂废水处理系统(10 m³/d)、油脂以及蛋白质厂废水处理系统(7.5 m³/d)、小规模城市污水处理系统(10 m³/d)、粪便处理系统(0.5 m³/d)和大规模城市污水处理系统(20 m³/d)。

20 世纪 80 年代初,Thetford 公司将 Cycle-Let 工艺用于更大规模的污水处理,如大型办公楼、运动区、商业中心、工业区等,这些地方都要求对冲洗水进行回用以减少污水的排放。日本的三井石化公司采用活性污泥法与平板膜相结合,直接处理未经稀释的高浓度粪便污水,取得了良好的效果。用于处理大楼生活污水时,该工艺不仅能够很好地去除 COD 和 BOD,而且还能够有效地去除细菌,出水可以直接作为草地喷洒水、楼房中水道用水和汽车冲洗水。

1982 年,Dorr-Oliver 公司采用膜厌氧反应器(MARS)处理高浓度食品废水。与此同时,英国采用超滤膜和微滤膜研制出了 2 套污水处理工艺,其概念在南非得到进一步发展并最终形成了厌氧消化超滤工艺(ADUF)。

1988 年,Yamamoto 等人将中空纤维膜组件直接置于活性污泥反应器中,开发出了一体式 MBR 新工艺,将 MBR 的能耗大大降低。自此以后,MBR 在结构形式上分为了分置式和一体式两种。与此同时,Zenon 公司为了减少泵的能耗,开发出了 ZeeWeed 淹没式中空纤维膜组件,并于 1993 年使之进入商业化应用。

20 世纪 80 年代末和 90 年代初,Zenon 公司将美国 Dorr-Oliver 公司早期在工业污水领域的研究进一步深入,成功研制出了 Zenon-Gen、PermaFlow Z—8 等系列工艺,尤其是形成了 ZW—145、ZW—500、12 件组合 ZW—150、8 件组合 ZW—500 等一系列产品,大大推动了 MBR 技术的市场化进程。

1.3.1.3 第三阶段(1990 年至今)

20 世纪 90 年代以后,国际上对 MBR 在生活污水、工业废水以及饮用水等方面的处理进行了大量的研究,对 MBR 研究的广度和深度都在不断拓展,MBR 进入了快速发展阶段。1990 年,Chiemchaisri 等人进行了中空纤维膜—生物反应器中试规模的研究。1991 年,Livingston 采用选择性高分子憎水硅橡胶制成了萃取 MBR,即隔离式 MBR。同年,Brook 和 Livingston 采用该工艺进行了 3-氯硝基苯及硝基苯的降解并取得了良好的处理效果。而 Freitas 和 Livingston 则使用该工艺对有毒、易挥发的 1,2-二氯乙烷进行了处理。1992 年,Chiemchaisri 等人采用 MBR 工艺处理生活污水,结果表明,系统出水水质优于传统二级处理后再经消毒的水。1992 年,J. Chand 采用 MBR 进行了饮用水脱氮的研究。1993 年,Krarth 采用 MBR 进行了脱氮的研究。1993 年,Harada 采用 MBR 进行了高效氨氮硝化的研究。1994 年,Trouve 等人将无机膜生物反应器工艺运用至巴黎的 Aubergenville WWTP 以处理城市废水,处理能力为 1 840 m³/d,结果表明,该工艺对 SS、BOD 的去除率大于 99.9%,对 COD 的去除率大于 96%,对 NH₃-N 的去除率大于 97%。1996 年,Kobayashi 等人采用带电聚丙烯腈超滤 MBR 处理蛋白胨合成废水,结果表明,正电膜的过滤性能优于负电膜。1997 年,Scott 等人采用 MBR 工艺处理冰激凌厂废水并促进曝气取得成功^[12]。

1.3.2 MBR 在国内的发展概况

MBR 在我国的应用研究首先是从循环式 MBR 开始的。1991 年,岑运华把 MBR 在日本的研究情况进行了介绍。1993 年,上海华东理工大学环境工程研究所对 MBR 处理人工合成污水以及制药废水的可行性进行了研究。同年,中国科学院环境工程研究中心王菊思对 MBR 进行了研究。1995 年,樊耀波采用 MBR 处理石油化工污水,并成功研制出了一套实验室规模的好氧分离式 MBR,该工艺对石油化工污水中 COD、BOD₅、SS、浊度、石油类的去除率分别为 78%~98%、96%~99%、74%~99%、98%~100%、87%。

近年来,MBR 的处理对象不断得到拓展^[13-20]。1997 年,邢传宏采用无机膜—生物反应器处理生活污水,考察了 MBR 在不同 SRT 下的处理效果,进行了膜堵塞及清洗的研究。1998 年,管运涛进行了两相厌氧 MBR 工艺的研究,结果表明,该工艺对 COD 的去除率为 95%,对 SS 的去除率超过 92%,酸化率为 60%~80%,气化率为 80%~90%。1999 年,吴志超采用 MBR 处理 COD 浓度高达 3 000~12 000 mg/L 的巴西氨基酸生产废水。2000 年,王连军采用无机膜—生物反应器处理啤酒废水。顾平等采用 MBR 处理生活污水,试验结果表明:系统出水悬浮物为零,细菌总数优于饮用水标准,COD 和氨氮去除率均高于

95%，出水可直接回用。

1.4 MBR 的分类

MBR 的分类方法有很多，这里主要是按照反应器的构造方式、膜组件的性质以及生物降解类型来分类。

1.4.1 按反应器的构造方式分类

按照反应器的构造方式来分，目前在市场上应用的 MBR 主要有两种，一种是循环式，另一种是淹没式^[21-28]。

1.4.1.1 循环式 MBR

如图 1-1 所示，在循环式 MBR(recirculated membrane bioreactor, RMBR)中，膜组件安置在曝气池的外部，因此该形式的反应器又被称为分置式 MBR。

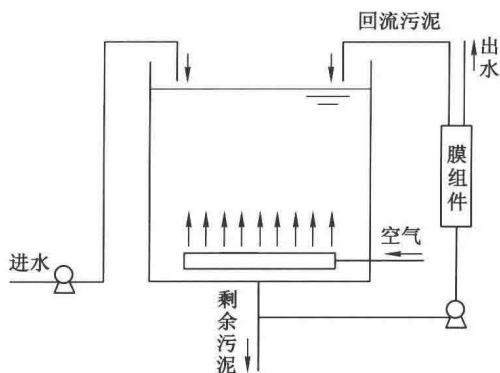


图 1-1 循环式 MBR 工艺流程图

循环式 MBR 通常采用加压型过滤，加压泵从生物反应器内抽水并压入膜组件中，滤后水排出系统，浓缩液回流至生物反应器中。

循环式 MBR 具有以下特点：

(1) 膜组件和生物反应器各自分开、独立运行，因而相互干扰较小，易于调节和控制。

(2) 膜组件置于生物反应器之外，易于清洗和更换。

(3) 膜组件在有压条件下运行，膜通量较大，且加压泵产生的工作压力在膜组件承受压力范围内可自由调节，从而可以根据需要自由调整膜通量。

(4) 由于采用加压泵，分置式 MBR 的动力消耗较大。

(5) 生物反应器中的活性污泥始终都在加压泵的作用下循环，某些微生物菌体经过加压泵时会在叶轮的高速旋转而产生的剪切力下产生失活现象。

循环式 MBR 由于具有结构紧凑、占地面积小、膜组件易于清洗等优点,目前在工业废水的处理中应用较为广泛^[29]。其缺点是动力费用过高,每吨出水的能耗为 2~10 kW·h,为传统活性污泥法能耗的 10~20 倍,因此,能耗较低的淹没式 MBR 逐渐引起了人们的关注。

1.4.1.2 淹没式 MBR

淹没式 MBR (submerged membrane bioreactor, SMBR),又称为一体式 MBR。该工艺由 K. Yamamoto 于 1989 年首次提出^[30],其结构特点是将膜组件直接浸没于曝气池中,如图 1-2 所示。在这种工艺中,混合液在跨膜压差的作用下流入膜组件,在膜的过滤作用下,污泥被截留在膜表面,而滤后水自膜组件中流出。曝气头一般安装在膜组件的下方^[31]。曝气有两种功能:一是为生化反应提供充足的溶解氧;二是提供上升气泡冲刷膜表面以控制膜污染。

由于比循环式 MBR 节省更多的能耗,淹没式 MBR 近年来逐渐成为了研究的热点,目前在城市污水的处理中应用较为普遍^[32]。

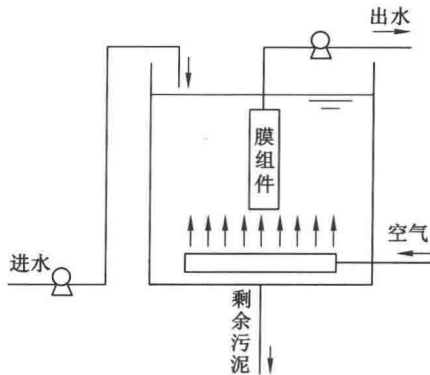


图 1-2 淹没式 MBR 工艺流程图

1999 年,Ueda^[33]等人在淹没式 MBR 的基础上开发出了重力自压流淹没式 MBR,并进行了中试规模的试验,试验装置如图 1-3 所示。很明显,与采用泵抽吸的淹没式 MBR 相比,该工艺能节省更多的能耗。

淹没式 MBR 的主要特点有:

- (1) 由于膜组件置于生物反应器中,系统的占地面积较小。
- (2) 采用抽吸泵或真空泵抽吸出水,能耗远远低于循环式 MBR。相关数据表明,淹没式 MBR 每吨出水的能耗为 0.2~0.4 kW·h,约是循环式 MBR 的 1/10。若采用重力出水,则可完全省去这部分费用。

(3) 淹没式 MBR 不使用加压泵,因此,可避免微生物菌体因受到剪切而失活。