

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.007

纯膜 MBBR 工艺在国内外的工程应用

周家中, 吴迪, 郑临奥

(青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要: 纯膜 MBBR 工艺系统不设二沉池, 无污泥回流, 以附着态形式存在的悬浮载体生物膜完成污染物的去除, 生物膜在流化的作用下实现动态更新, 无需反冲洗, 具备极佳的抗低温性能, 处理负荷高, 停留时间短, 可灵活应用于污水厂各工艺段, 从而获得优良的出水水质。总结了纯膜 MBBR 工艺污染物的去除特性, 描述了该工艺脱碳、硝化和反硝化过程。介绍了国外 Lillehammer、Gardermoen、Sjolunda、Phillips Petroleum Borger、TAU 污水厂纯膜 MBBR 工艺的设计和应用情况, 回顾了国内纯膜 MBBR 工艺在微污染水、工业废水、市政污水、高氨氮废水处理中的应用情况。实践应用表明, 纯膜 MBBR 工艺结合更加紧凑的深度处理工艺, 最大可节约 80% 的占地, 去除负荷高, 工艺流程短, 具有占地省、投资低、运行简便等优势, 适用于污水厂新建以及扩容提标, 具有极大的发展空间和广泛的应用前景。

关键词: 移动床生物膜反应器; 悬浮载体; 生物膜; 纯膜 MBBR; 微污染水; 厌氧氨氧化; 应急; 占地受限

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2020)22-0037-11

Engineering Application of Pure MBBR Process at Home and Abroad

ZHOU Jia-zhong, WU Di, ZHENG Lin-ao

(Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: There is no secondary sedimentation tank and sludge return system in the pure MBBR process. The pollutants can be removed effectively by biofilm which attached to the suspended carriers. The biofilm can be dynamically renewed by fluidization without backwashing. The pure MBBR process has excellent advantages, such as low temperature resistance, high removal loading, short retention time, flexibility application to the many sections of WWTP, so as to obtain excellent effluent quality. In this paper, the characteristics of removal pollutants in pure MBBR process are summarized, and the decarbonization, nitrification and denitrification processes are described as well. The design and application of pure MBBR process in Lillehammer WWTP, Gardermoen WWTP, Sjolunda WWTP, Phillips Petroleum Borger WWTP, and TAU WWTP which are located abroad are introduced. The application of pure MBBR process in micro-polluted water, industrial wastewater, municipal wastewater and high ammonia nitrogen wastewater in China are reviewed. Practical application shows that the pure MBBR process combined with a more compact advanced treatment process can save up to 80% of the land occupation compared with the conventional process. The pure MBBR process has the advantages of high removal loading, short process flow, low land occupation, low investment and simple operation. It is

suitable for new construction and expansion of WWTP, and has great development space and wide application prospect.

Key words: MBBR; suspended carrier; biofilm; pure MBBR; micro-polluted water; anommox; emergency; limited occupancy area

移动床生物膜反应器(MBBR)起源于20世纪80年代末的挪威,是一种新型的生物段强化处理技术。工艺基于生物膜机理,通过向反应器中投加悬浮载体提高了系统生物量,丰富了微生物种群结构,从而实现了污染物的高效去除。1991年,首个以MBBR为概念的专利申请成功,同年第一座应用MBBR工艺的Lardal污水处理厂在挪威顺利投入使用^[1],掀起了MBBR工艺全球推广的序幕。MBBR工艺于2000年初引入国内,开展了一系列工艺研究及小规模工程实践,但受限于工程经验不足,工艺落地推广受阻。2008年,国内首个大型MBBR项目在无锡芦村污水厂成功实施^[2],标志着悬浮载体流化与拦截等工程难题得以解决。在此后的10余年间,MBBR工艺逐步发展并成为污水厂新建和升级改造的主流工艺。

目前,国内应用MBBR工艺的市政污水处理厂数量在250座以上,总规模超过 $1\ 500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,同时在工业废水处理、给水预处理、河道水净化、农村点源污染治理等领域有着大量应用。MBBR工艺分为泥膜复合MBBR工艺和纯膜MBBR工艺两种形式^[3]。在我国城镇污水厂提标改造政策实施的大背景下,泥膜复合MBBR工艺以其与原工艺紧密结合、原池改造无需新增用地等方面的优势,得到了广泛应用;而纯膜MBBR工艺的大规模应用尚处于起步阶段。

1 纯膜 MBBR 工艺及污染物去除特性

1.1 纯膜 MBBR 工艺简介

纯膜 MBBR 工艺不富集活性污泥,污染物的去除全部依赖于附着态生物膜,系统不设置污泥回流,运行方式如图1所示。

从微生物存在形式方面看,纯膜 MBBR 工艺更接近曝气生物滤池(BAF)工艺,但进水不受有机物和SS浓度的影响,生物膜在流化的作用下实现动态更新,无需反冲洗,停留时间不受滤速限制。从功能区域布置方面看,纯膜 MBBR 工艺可应用于好氧和缺氧系统,具体如图2所示。好氧、缺氧纯膜 MBBR 工艺,既可以独立使用,分别用于强化硝化和反硝

化,也可以联合使用,形成A/O、A/O/A/O工艺用于污水脱氮。

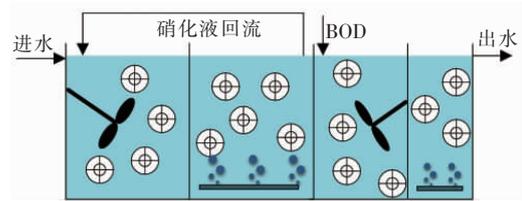


图1 纯膜 MBBR 工艺运行示意

Fig.1 Operation diagram of pure MBBR process

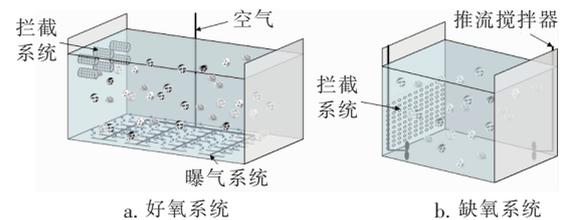


图2 好氧以及缺氧系统纯膜 MBBR 的工艺应用形式

Fig.2 Process application form of pure MBBR under aerobic and anoxic conditions

在好氧系统中,曝气具有双重功能,一方面负责悬浮载体的流化,另一方面负责向好氧微生物提供氧气,用于有机物的去除及硝化反应。曝气系统一般平铺于反应器池底,由微孔或者穿孔曝气组成。在缺氧系统中,悬浮载体通过专用推流搅拌器实现流化。无论是在好氧区还是缺氧区,均需在出水口设置拦截筛网以持留悬浮载体,保障悬浮载体在专性区域内培养。

1.2 纯膜 MBBR 工艺用于脱碳

纯膜 MBBR 工艺对生活污水中有机物的去除效率与传统活性污泥法相似,可达95%以上。其系统处理能力主要与投加悬浮载体的总有效表面积相关,用于脱碳的 MBBR 反应器停留时间较短,一般为15~90 min。

表1列举了挪威4座采用纯膜 MBBR 工艺污水处理厂的有机物去除效果^[4],4座污水处理厂均采用两级纯膜 MBBR,设计水温为10℃。从表1可以看出,纯膜 MBBR 工艺对于 BOD_7 的处理能力较好,

去除率可以达到 97% 以上,且系统的抗冲击负荷能力较强。

表 1 挪威 4 座污水厂的有机物去除效果

Tab. 1 Organic pollutant removal efficiency of four WWTPs in Norway

项 目		BOD ₇			COD		
		进水/ (mg · L ⁻¹)	出水/ (mg · L ⁻¹)	去除率/ %	进水/ (mg · L ⁻¹)	出水/ (mg · L ⁻¹)	去除率/ %
Steinsholt 污水厂	平均值	398	10	97.4	833	46	94.4
	最大值	1 720	38	99.7	2 760	130	98.4
Tretten 污水厂	平均值	361	4	98.9	—	—	—
	最大值	695	46	99.7	—	—	—
Svarstad 污水厂	平均值	—	—	—	403	44	89.0
	最大值	—	—	—	850	83	94.0
Frya 污水厂	平均值	18	5	97.7	—	—	—
	最大值	290	20	99.0	—	—	—

1.3 纯膜 MBBR 工艺用于硝化

硝化菌属于自养菌,生长速率较慢。在以活性污泥法为核心工艺的污水厂中,其相对丰度一般不大于 2%,生物量低且极易受低温、高盐等特殊水质的影响,导致污水厂出水氨氮难以稳定达标,是污水厂运行的核心难点。

MBBR 工艺悬浮载体生物膜泥龄较长,可达 30

d 以上,实现了对硝化菌等长泥龄菌的高效富集;通过悬浮载体的专性培养,实现了微生物的专性富集和定向筛选,在应对高盐、低温、有机物冲击等特殊水质及冲击时同样能够获得较好的处理效果,保障出水氨氮的稳定达标^[5-6]。表 2 对比了泥膜复合 MBBR 工艺中悬浮载体生物膜和活性污泥对于硝化菌的富集能力^[7-13]。

表 2 悬浮载体生物膜和活性污泥系统微生物对比

Tab. 2 Comparison of microorganisms between suspended carrier biofilm and activated sludge system

水质类型	水温/℃	处理水量/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	实际出水氨氮/ (mg · L ⁻¹)	Nitrosomonas (AOB) 丰度/%		Nitrospira (NOB) 丰度/%	
				活性污泥 系统	悬浮载体 生物膜	活性污泥 系统	悬浮载体 生物膜
生活污水 + 工业废水	13	8	2.42	0.15	1.35	0.97	6.08
生活污水	10 ~ 12	7	0.94	—	—	1.09	8.51
生活污水	12	16	0.27	0.50	3.80	2.50	27.80
工业废水	10 ~ 12	4	0.90	—	—	0.75	7.32
生活污水 + 工业废水	8 ~ 10	6	0.87	0.80	5.16	1.52	6.54
生活污水 + 工业废水	12	8	0.23	1.68	—	—	13.17
生活污水	6 ~ 8	1	1.51	<1.0	7.64	<1.0	1.97

从表 2 可以看出,悬浮载体生物膜对于硝化菌的富集能力远高于活性污泥系统,且优势硝化菌属为硝化螺旋菌(*Nitrospira*)。最新的研究表明,部分 *Nitrospira* 菌种兼具氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂-oxidizing bacteria)的功能,具有全程氨氧化的能力,即一类微生物可以完成氨氮氧化成硝酸盐的过程。*Nitrospira* 比生长速率低,对基质的亲和力更强,在氨氮浓度较低的环境中更具竞争优势,可作为高排放标准污水处理厂稳定运行的指示性微生物^[14]。进一步的追踪研究表明,随着运行时间的延长,悬浮载体生物膜更加成熟,*Nitrospira* 的相对丰度随之升高,保障了系统出水氨氮在极端条件下的稳定达标

排放。

1.4 纯膜 MBBR 工艺用于反硝化

根据功能区的布置,纯膜 MBBR 工艺用于反硝化可以分为前置反硝化、后置反硝化以及同步硝化反硝化 3 种过程。

① 前置反硝化

反硝化区位于执行硝化功能的 MBBR 区前端,通过硝化液回流至缺氧反硝化区进行脱氮。前置反硝化区的脱氮能力有限,主要与回流比有关,一般回流比控制在 150% ~ 250%,超过此值会降低脱氮效率^[4]。硝化液回流会携带一定的溶解氧,从而抑制反硝化过程,因此通常在曝气区后设置脱气区以降

低 DO 浓度的不利影响。前置反硝化区利用的有机碳源主要是进水中溶解性有机物。在无外加碳源的情况下,由于废水的特性、环境条件、运行参数等不同,可能会造成反硝化速率具有较大的差异性,如 Gardermoen 污水处理厂,在内回流比均值为 111% 的条件下,由于缺氧区 C/N 高且回流携带的 DO 浓度低,所以反硝化速率可以达到 $0.295 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。而 Frevar 污水处理厂由于进水中可溶性有机物浓度低,所以反硝化速率只有 $0.033 \sim 0.109 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

② 后置反硝化

反硝化区位于执行硝化功能的 MBBR 区的后端,与前置反硝化相比,采用后置反硝化需要在预处理段采用强化沉淀技术,以尽可能多地去除有机物,从而降低其对好氧硝化过程的不利影响。后置反硝化主要通过投加外碳源进行脱氮,由于碳源性质较原水好、利用率高,所以脱氮负荷较前置反硝化更高,占地更小并且更加易于控制。唯一不足的是药剂消耗量较大,如果能将预沉池的污泥进行碳源提取并用于反硝化,将实现污水厂的运行双赢,既节省了外加碳源,又实现了高效脱氮。此外,需要注意的是,采用预沉淀工艺强化脱碳,需严格控制出水的磷酸盐浓度,以保障后续生化过程中足够的营养物浓度。

③ 同步硝化反硝化过程(SND)

对于 MBBR 工艺,悬浮载体生物膜受传质传氧的影响,易发生分层分布现象。溶解氧从悬浮载体生物膜表面向内层传递的过程中存在浓度梯度,表层 DO 浓度较高为好氧区,以好氧硝化细菌为主,随着溶解氧传递受阻及外层 DO 的消耗,生物膜内层形成缺氧区,反硝化菌占据优势,从而实现 MBBR 同步硝化反硝化脱氮^[15]。北方某污水厂采用 MBBR 工艺,在好氧区内存在稳定的 SND 过程, TN 去除率为 15% ~ 20%, 经过验证,确认 SND 过程主要来自于悬浮载体生物膜。高通量测序结果表明,悬浮载体生物膜上的反硝化菌相对丰度为 8.34%, 硝化菌相对丰度为 28.56%, 保障了悬浮载体生物膜稳定的 SND 过程^[16]。南方某污水厂采用 MBBR 工艺,在好氧区发现 28% ~ 46% 的 TN 得到去除, SND 的加持可节约碳源费用 1 343.2 万元/a, 在保障出水水质达标的基础上,大大降低了运行费用^[17]。目前,尚未有纯膜 MBBR 实现同步硝化反硝

化的工程报道。

2 纯膜 MBBR 工艺在国外的应用

MBBR 工艺在国外应用超过 30 年,工程案例超过 1 000 项,应用于不同体量、不同水质的污水厂,处理效果稳定。

2.1 Lillehammer 污水处理厂

Lillehammer 污水处理厂位于挪威利勒哈默尔市,原工艺为一级强化沉淀工艺,用于去除 SS 和 TP,出水排入 MJOSA 湖。由于接纳水体逐步呈现富营养化,并且时值该市承办 1994 年冬季奥运会,因此,在 1992 年对污水厂进行提标改造,升级为具备脱氮除磷功能的污水处理厂。因扩建场地有限,且冬季最低水温达到 $3.5 \text{ }^\circ\text{C}$,这就要求处理工艺必须高效紧凑且具备良好的抗低温冲击能力。经过多种工艺对比,最终选择纯膜 MBBR 工艺。

Lillehammer 污水处理厂设计水量 $2.88 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计进、出水水质见表 3。生化池采用多级 A/O 纯膜 MBBR,工艺流程见图 3。纯膜 MBBR 池根据功能区共划分为 9 格,其中前 2 格为缺氧区;第 3 格为可调区,冬季低温时按好氧运行,夏季按缺氧运行;第 4、5 格为好氧区;第 6、7、8 格为缺氧区,硝化液内回流从第 6 格开始,减少回流所携带的 DO,在第 7 格投加乙醇用于反硝化;第 9 格为好氧区,主要目的为充氧以及去除残留的有机物。该项目不设二沉池,总 HRT 仅为 3.2 h。

表 3 Lillehammer 污水厂设计进、出水水质

Tab. 3 Design influent and effluent quality in Lillehammer WWTP

项目	BOD ₇	COD	TSS	TN	TP
设计进水/(mg · L ⁻¹)	101	206	101	26	3.7
设计出水/(mg · L ⁻¹)	10	—	—	—	0.2
设计去除率/%	90	—	—	>70	95

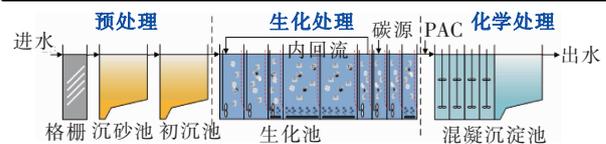


图 3 Lillehammer 污水处理厂工艺流程

Fig. 3 Process flow of Lillehammer WWTP

实际运行结果显示,该污水厂出水各指标稳定达到设计标准。由于在硝化前端有机物去除较为彻底,第 4 格的硝化速率较高,基本可以实现氨氮的去除,且运行不受低温的影响。缺氧区在外投碳源足够的情况下,几乎可以将硝态氮完全去除。2005 年

的运行数据显示,该污水厂出水 BOD_7 、COD、TN、TP 分别为 2.2、35、2.9、0.12 mg/L。碳源的消耗比率为 3.3 gCOD/gTN,碳源利用率高。值得注意的是,该污水厂出水 $TN < 3$ mg/L,证明了 MBBR 工艺对 TN 的高效去除效果,为国内严格的 TN 排放标准提供了工艺借鉴。该污水厂自 1994 年通水以来,已稳定运行 26 年,中途未补投悬浮载体,出水水质稳定达标。

2.2 Gardermoen 污水处理厂

Gardermoen 污水处理厂位于挪威奥斯陆机场,为新建项目。该污水厂处理水量为 2.21×10^4 m³/d,于 1998 年通水运行,设计工艺流程见图 4。Gardermoen 污水处理厂采用多级 A/O 纯膜 MBBR 工艺,生化池停留时间为 6.3 h,悬浮载体平均填充率为 58.5%。

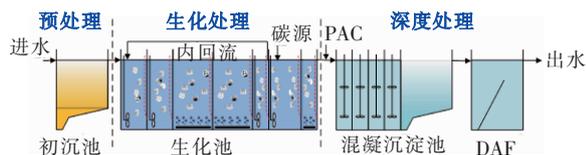


图 4 Gardermoen 污水处理厂工艺流程

Fig. 4 Process flow of Gardermoen WWTP

该污水厂实际运行效果如表 4 所示,生化段进水氮素浓度升高主要是由于侧流污水回流所致。在冬季水温为 6~7℃ 的不利条件下,出水氨氮为 0.26 mg/L, TN 均值为 2.16 mg/L, TN 去除率达到 95.5%,其中前置反硝化区可以去除 85%~90% 的硝酸盐。通过化学除磷作用,出水 TP 浓度低至 0.15 mg/L。

表 4 污水厂实际进、出水水质

Tab. 4 Actual influent and effluent of Gardermoen WWTP

mg · L⁻¹

项目	BOD ₇	COD	SS	TN	NH ₄ ⁺ - N	TP
实际进水	188	643	278	44.2	28.6	7.7
生化段进水	—	442	105	48.5	29.1	—
实际出水	8.0	33	12	2.16	0.26	0.15

该污水厂的运行结果表明,C/N 比是影响反硝化脱氮的重要因素,其比值应保持在 4~5 gBSCOD/gNO_x⁻ - N 之间。此外,还应严格控制硝化液回流比。后置反硝化区通过外投碳源,使 C/N 比达到 3.8 gBSCOD/gNO_x⁻ - N,此时 TN 的平均去除率可以达到 98%,反应器出水硝态氮平均为 0.33 mg/L。在运行费用方面,通过优化处理流程,减少了化学药

剂和能源消耗,预计节约 12.5~13.0 万美元/a 的运行费用,节能降耗效果显著。

Gardermoen 污水厂运行现场见图 5。



图 5 Gardermoen 污水处理厂运行现场

Fig. 5 Operation scene of Gardermoen WWTP

2.3 Sjolunda 污水处理厂

Sjolunda 污水处理厂位于瑞典,处理规模 15×10^4 m³/d。该厂原有两条生化处理路线:一条为活性污泥工艺,另一条为生物滤池工艺,三级处理工艺为气浮。1996 年,该污水厂要求执行新的排放标准,其中 $BOD_7 < 12$ mg/L, $TN < 10$ mg/L, $TP < 0.3$ mg/L。为达到此标准需要对原工艺进行升级改造,要求能够充分利用现有的构筑物,采用紧凑型污水处理工艺并降低投资成本。最终改造实施路线为:①升级原活性污泥工艺,并接纳全部的进水;②将原生物滤池改为硝化池,接纳活性污泥工艺出水;③增加纯膜 MBBR 工艺用于后置反硝化脱氮。改造后的工艺流程见图 6。

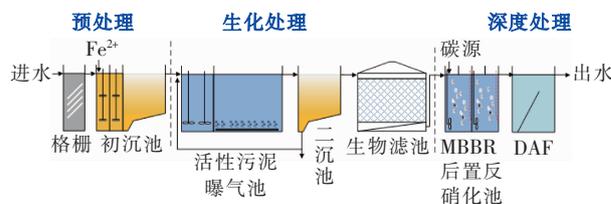


图 6 Sjolunda 污水处理厂工艺流程

Fig. 6 Process flow of Sjolunda WWTP

MBBR 区设计水温为 10℃,设两级反硝化区,填充率 50%,采用甲醇为碳源,基于对 MBBR 进水硝酸盐浓度的在线监测控制碳源的投加量。长期运行结果显示,MBBR 区进水硝态氮浓度在 17~22 mg/L,由于 MBBR 池的进水含氧量(8~9 mg/L)高,因此碳源的投加比例高于理论值,C/N 在 3.5~4.0 gBSCOD/gNO_x⁻ - N 之间。在 1.6 h 的停留时间下,对 TN 的去除率 > 80%^[18]。需要注意的是,如果进

水中的磷酸盐浓度较低,会降低系统的反硝化性能,导致出水硝酸盐浓度升高,外投碳源得不到充分利用使得出水 BOD_7 浓度增加,所以需要不定时根据水质投加磷酸盐。Sjolunda 污水处理厂经过 11 年的运行,未置换或补充悬浮载体,运行效果良好。

2.4 Phillips Petroleum Borger 污水处理厂

Phillips Petroleum Borger 污水处理厂在运行过

表 5 Phillips Petroleum Borger 污水处理厂设计参数

Tab. 5 Design parameters of Phillips Petroleum Borger WWTP

项目	处理水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	设计可溶性 BOD 负荷/($kg \cdot d^{-1}$)	有效池容/ m^3	设计停留时间/h	填充率/%
设计值	19 680	3 018	1 927	2.35	30

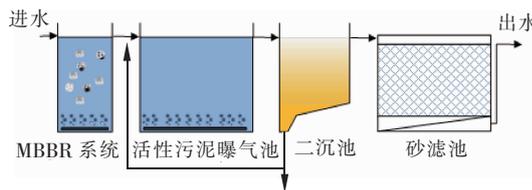


图 7 Phillips Petroleum Borger 污水处理厂工艺流程

Fig. 7 Process flow of Phillips Petroleum Borger WWTP

该污水厂于 1999 年 3 月开始启动 MBBR 工艺。在进水 COD 为 300 ~ 450 mg/L 的情况下,出水由原来的 60 ~ 110 mg/L 降低至 40 ~ 60 mg/L。改造后实际进水流量超出设计值 10%,而系统抗冲击性能良好,出水稳定达标。在氨氮方面,改造前系统的出水氨氮和进水氨氮呈正相关性,极不稳定,出水氨氮在 1 ~ 9 mg/L 之间。而自运行 MBBR 工艺后,出水氨氮浓度就呈现下降趋势,1 个月之后系统出水氨氮稳定低于 1 mg/L,效果明显^[19]。

2.5 TAU 污水处理厂

挪威 Tonsberg 的 TAU 污水处理厂在升级改造过程中主要面临二级工艺扩建的问题。如果采用传统的活性污泥法,就需要新建大型的生化池以及二沉池,占地较大且工程量大;如果采用纯膜 MBBR 工艺,则通过现有池体的改造即可满足要求。此外,在 8 °C 的低温条件下,纯膜 MBBR 的有机负荷高,通过提高填充率,也能满足远期进一步提标的要求,所以最终采用纯膜 MBBR 工艺实施改造。表 6 对比了采用纯膜 MBBR 工艺和常规活性污泥法进行升级改造的投资和运行成本。

从表 6 可以看出,纯膜 MBBR 工艺的投资成本仅为活性污泥工艺的 26.4%,管理和运行成本仅为活性污泥工艺的 22.5%,投资和运行管理费用均较低。

程中遇到的最大问题是在满负荷运行工况下,出水氨氮始终难以达标。经过论证发现,进水有机负荷较高,影响了硝化过程。项目最终采用纯膜 MBBR 工艺,并置于活性污泥系统之前,提高系统对有机物的去除能力,从而发挥活性污泥系统的硝化性能,保障氨氮的达标。该污水厂设计参数见表 5,工艺流程见图 7。

表 6 TAU 污水处理厂 MBBR 工艺与活性污泥工艺相对成本 (设定 MBBR 工艺的投资成本为 100)

Tab. 6 Relative cost of MBBR process and activated sludge process in TAU WWTP (set the investment cost of MBBR process as 100)

项目	相对成本	
	MBBR 工艺	活性污泥工艺
投资成本	100	378
管理和运行成本	1.8	8.0
年总成本	12.8	50

2.6 国外应用总结

总结国外纯膜 MBBR 应用情况,发现其具有以下特征:①耐低温能力强,典型案例中在生化池水温低至 3.5 °C 的情况下,纯膜 MBBR 仍然维持了较好的脱氮性能;②出水效果好,能够实现污染物的生化极限去除,远优于国内的一级 A 标准,部分指标如氨氮优于国内地表 IV 类水标准;③停留时间短,负荷高,属于节地集约型技术,生化池停留时间基本为 3 ~ 6 h,与常规工艺相比,停留时间大范围缩短,大大节省了占地;④工艺应用灵活,既可作为主体生化功能实现脱氮,也可作为生化段的前预处理脱碳,或在生化段之后替代反硝化滤池强化总氮去除。

纯膜 MBBR 工艺,虽然相比 BAF 工艺,不需要反冲洗进行生物膜更新,但并不具备泥水分离功能,后端仍需要泥水分离工艺。一般情况下,纯膜 MBBR 工艺出水 $SS < 300$ mg/L,且腐殖生物膜特性与活性污泥有一定差别,采用二沉池的设置方式并不适宜,可直接进行化学沉淀。纯膜 MBBR 工艺宜采用的泥水分离工艺有混凝沉淀、气浮、滤池,单独使用或组合应用。虽然泥水分离工艺选择较多,但均借鉴了活性污泥法的泥水分离技术,并未针对腐殖生物膜特点开发针对性的处理技术。

3 纯膜 MBBR 工艺国内应用情况

国内纯膜 MBBR 工艺的大规模应用尚处于起

步阶段,表 7 列举了国内部分采用纯膜 MBBR 工艺的污水厂。

表 7 国内纯膜 MBBR 工程应用

Tab. 7 Engineering application of domestic pure MBBR

项 目	江苏某原水预处理厂	山东某石化污水处理站	广东某水质净化厂	广东省某应急污水处理项目	山东省某制药废水处理厂
水质类型	微污染水	石化废水	工业废水 + 生活污水	生活污水	制药废水
项目类型	新建	改建	改建	新建	改建
实施时间	2019 年	2009 年	2017 年	2020 年	2019 年
处理量/(m ³ ·d ⁻¹)	300 000	5 000	18 000	30 000	1 000
MBBR 所处位置	二级处理	深度处理	深度处理	二级处理	二级处理
MBBR 功能	硝化	脱碳 + 硝化	脱碳 + 硝化	脱碳 + 脱氮	自养脱氮
MBBR 区填充率/%	40	53	50	50	56
MBBR 池停留时间/h	1.0	6.3	—	1.99	14.8
深度处理工艺	中置式高密度沉淀池	UF + RO 双膜工艺	—	超效分离	—
出水标准	《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类标准	《山东省半岛流域水污染物综合排放标准》(DB 37/676—2007)	《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准	《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准	《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准

3.1 江苏某原水预处理厂

江苏某净水厂设计水量 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 自运行以来,其水源地长期面临沿线农业面源、城镇化、工业化发展带来的污染,水质恶化严重,难以达到地表水 III 类标准要求。尤其是高锰酸盐指数和氨氮等指标在 7 月—9 月分别高达 9.1 mg/L 和 1.8 mg/L , 给水厂水质达标带来了很大的难度。因此本项目采用新建预处理厂来提升原水水质,设计规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。综合进出水水质、投资占地等因素分析,经充分技术经济论证和方案比选,采用高锰酸钾预氧化 + 纯膜 MBBR 工艺 + 中置式高密度沉淀池组合工艺进行处理,该原水预处理厂运行现场见图 8。



图 8 江苏某原水预处理厂运行现场

Fig. 8 Operation scene of a raw water pretreatment plant in Jiangsu Province

核心 MBBR 生化段保障进水氨氮由 1.8 mg/L 降低至 1.0 mg/L 。实际运行结果显示,稳定运行期

间出水 COD_{Mn} 和氨氮均值分别为 4.5 mg/L 和 0.2 mg/L , 稳定达到地表 III 类水体要求。其中氨氮最低可低于 0.1 mg/L , 去除率最高可达到 85% 以上。MBBR 区实际气水比为 $1.0 \sim 1.3$ 。全厂电耗平均值为 $0.052 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, 以电价为 $0.74 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 核算,运行成本为 $0.038 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

3.2 山东某石化污水处理站

山东某石化污水处理站设计规模 $5 000 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用氧化沟工艺,原出水执行《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 二级排放标准,随着接纳水体水质的逐步恶化,要求提高处理站的排放标准。所以对该污水处理站进行中水回用升级改造,使出水水质达到《山东省半岛流域水污染物综合排放标准》(DB 37/676—2007),并进一步处理达到回用水质要求,实现“零排放”。石化废水含盐、含油、含硫及碱渣等,可生化性较差,属于难降解废水。中水回用工程采用纯膜 MBBR 工艺对原氧化沟出水进行深度生化处理,并在后续增加核桃壳过滤器、炭床 + 砂滤、UF + RO 双膜工艺。其中 MBBR 工艺作为双膜法的预处理,要求实现稳定的深度生化处理,解决膜系统的有机污染问题,以保护后续双膜法的长期稳定运行和降低膜维保成本。MBBR 池设计进水 COD 为 120 mg/L , 氨氮为 40 mg/L , 实际运行效果显示,MBBR 区氨氮去除率达到 90% 以上,出水稳

定低于 4 mg/L,基本在 2 mg/L 以下,出水 COD 保持在 40 mg/L 以下。该系统抗冲击能力强,即使在进水水质严重超标的情况下,出水依然保持稳定,有效保障了后续双膜系统的运行。

3.3 广东某水质净化厂

广东某水质净化厂设计水量 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中含氟废水 $4\ 115 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2017 年对该项目进行扩建,要求出水达到地表Ⅳ类水标准,原生化段采用多级 AO 工艺不变,在深度处理段加入纯膜 MBBR,进一步去除有机物和氨氮。MBBR 段设计进、出水水质见表 8。

表 8 广东某水质净化厂设计进、出水水质

Tab. 8 Design influent and effluent quality of a water purification plant in Guangdong Province $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ - N
设计进水	80	30	5
设计出水	30	6	1.5

表 9 广东省某应急污水处理项目设计进、出水水质

Tab. 9 Design influent and effluent quality of an emergency WWTP in Guangdong Province

项目	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ - N/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值
设计进水	250	120	200	30	4.0	6~9
设计出水	50	10	10	5(8)	0.5	6~9



图 9 广东省某应急污水处理项目运行现场

Fig. 9 Operation scene of an emergency wastewater treatment project in Guangdong Province

3.5 山东省某制药废水处理厂

将厌氧氨氧化工艺与 MBBR 相结合,形成基于 MBBR 的全程自养脱氮工艺,是纯膜 MBBR 工艺工程应用的一大创新。通过悬浮载体生物膜可以实现对硝化菌以及厌氧氨氧化菌的高效富集,从而实现单一反应器内的全程自养脱氮。山东省某制药废水处理厂进水氨氮浓度高达 950 mg/L, C/N 比较低,

实际运行结果显示,该系统抗冲击能力强,处理效果稳定达标。

3.4 广东省某应急污水处理项目

广东省某应急污水处理项目设计水量为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。此为新建项目,面临的主要问题为所提供的占地较少、工期紧张,需要 40 d 完成项目设计、建设与调试达标。综合考虑投资、占地、运行、工艺先进性等方面,最终采用了“预处理 + 纯膜 MBBR 工艺 + 超效分离”的组合工艺进行处理,项目设计进、出水水质见表 9。核心纯膜 MBBR 工艺停留时间仅 1.99 h,生化池占地指标为 $0.015 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。深度处理采用超效分离工艺,通过磁加载沉淀技术,强化 TP、SS 的去除,保障出水各项指标稳定达到一级 A 标准。该项目全厂占地指标为 $0.067 \text{ m}^2/\text{m}^3$,仅用时 1 周出水就稳定达到一级 A 标准。纯膜 MBBR 工艺的引入有效解决了污水厂占地小、工期紧的问题。该应急污水处理项目运行现场见图 9。

日常运行有机碳源消耗极大,所以亟需运行控制简便、出水水质稳定且具备节能降耗功能的新工艺。通过升级改造,原池嵌入基于纯膜 MBBR 的全程自养脱氮工艺,保障出水氨氮 $< 50 \text{ mg/L}$ 。该项目无新建工程、无有机碳源的投加、无厌氧氨氧化菌种的补投。采用自养脱氮工艺大幅削减了氮负荷,达到了节能降耗的目的。该污水厂采用的 CANON 悬浮载体见图 10。



图 10 山东省某制药废水处理厂 CANON 悬浮载体

Fig. 10 CANON suspended carriers for a pharmaceutical wastewater treatment plant in Shandong Province

3.6 国内应用总结

在国内,纯膜 MBBR 工艺应用类型较为广泛。在微污染水处理方面,利用生物膜法在低基质条件下高效去除污染物的特性,纯膜 MBBR 可用于给水的预处理、河道旁位处理等;在工业废水处理方面,纯膜 MBBR 工艺因其高负荷、占地省的优势而在石化、制药等领域广泛应用;在特殊菌种富集方面,悬浮载体具有选择性富集的特点,可作为厌氧氨氧化菌的培育载体,形成基于纯膜 MBBR 的厌氧氨氧化技术,如 ANITA™ Mox^[20]、NAUTO™^[21]等,用于高氨氮废水处理;在生活污水处理领域,纯膜 MBBR 具有高效集约的特点,适用于污水厂,尤其是全地下污水处理厂新建、污水厂大规模提量提标改造等情形。

4 纯膜 MBBR 工艺流程

在纯膜 MBBR 工艺流程上,从工程应用情况分析,其预处理与常规处理流程相同,包括格栅、沉砂池;同时,根据进水水质特点,可设置初沉强化沉淀工艺,强化去除颗粒物和胶体物。悬浮载体生物膜在动态更新过程中会有部分脱落并流入后段工艺,所以深度处理的作用是针对纯膜工艺出水进行泥水分离,去除 SS 以及强化除磷;核心工艺应采用磁混凝或溶气气浮(DAF)等效率较高、布置紧凑的工艺。典型的纯膜 MBBR 工艺路线如图 11 所示。

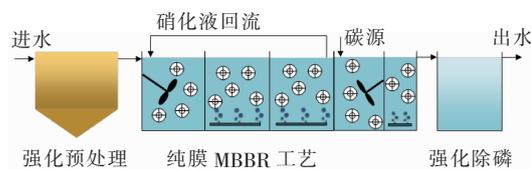


图 11 典型的纯膜 MBBR 工艺路线

Fig. 11 Typical process route of pure MBBR

纯膜 MBBR 工艺最核心的优势即去除负荷高、工艺流程短、占地省。表 10 列举了目前常用的纯膜 MBBR 工艺、泥膜复合 MBBR 工艺、MBR 工艺和 AAO 工艺在进水水质基本相同情况下的实际出水水质和设计 HRT^[9,22-23]。从表 10 可以看出,4 种处理工艺都可以使出水达到较高的排放标准,但纯膜 MBBR 工艺占地远低于其他 3 种工艺,仅生化池就比普通活性污泥法节省 50% 以上。由于纯膜 MBBR 工艺不需要二沉池,故实际此比例将会进一步提高。纯膜 MBBR 工艺后续泥水分离一般采用气浮工艺、磁混凝工艺等,整体占地更加紧凑,与传统工艺相比,最大可以节省 80% 的占地^[1]。需要说明的是,节省占地意味着高填充率,而在高填充率条件下如何保障悬浮载体流化是该工艺能否成功应用的前提,需要辅助水力模拟等手段进行针对性设计。

表 10 不同污水厂生化段 HRT 对比

Tab. 10 Comparison of HRT in different biochemical sections of WWTP

项 目	Nordre Follo 污水处理厂	浙江某污水处理厂	四川省某污水处理厂	山东省某污水处理厂
处理水量/(m ³ ·d ⁻¹)	18 000	160 000	35 000	300 000
二级处理工艺	纯膜 MBBR	泥膜复合 MBBR	MBR	AAO 工艺
设计水温/℃	3	12	15	12
HRT/h	4.95	12.3	9.33	10.35
进水 BOD/(mg·L ⁻¹)	139	130	150	150
进水 COD/(mg·L ⁻¹)	329	320	300	350
进水氨氮/(mg·L ⁻¹)	—	30	30	35
进水 TN/(mg·L ⁻¹)	42	40	40	45
出水 BOD/(mg·L ⁻¹)	2.8	2.16	4.9	7.6
出水 COD/(mg·L ⁻¹)	39.0	18.8	19.1	31.6
出水氨氮/(mg·L ⁻¹)	—	0.27	1.1	1.93
出水 TN/(mg·L ⁻¹)	9.7	8.43	8.3	6.08

5 结论

纵观国内污水厂提标改造或新建,所面临的共同问题即用地受限。在土地资源越来越稀缺的今天,亟需集约、高效、稳定的污水处理工艺。纯膜 MBBR 工艺与活性污泥法相比,布置紧凑,无需污泥

回流,无需二沉池,工艺流程短;与其他生物膜工艺相比,无需反冲洗,对于进水水质容忍度高;与 MBR 工艺相比,运行能耗低。对于新建污水厂,可以达到极简的工艺流程,运行控制简便。而对于改建工艺,则可以实现原池的提标提量,尤其是对于 SBR 类无

二沉池工艺的污水厂改建,将无需新增二沉池,工艺实施简单,投资成本低。在未来污水厂的实施过程中,纯膜 MBBR 工艺将会有更大的发展空间和更广泛的应用前景。

致谢:感谢廖足良博士为文章提供了部分国外工程案例照片。

参考文献:

- [1] Mannina G, Ekama G, Ødegaard H, *et al.* Advances in Wastewater Treatment[M]. UK: IWA, 2018.
- [2] Qu J, Wang H, Wang K, *et al.* Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives[J]. *Front Environ Sci Eng*, 2019, 13(6): 1-7.
- [3] Ødegaard H. New applications for MBBR and IFAS systems[A]. The Proceedings of Frontiers International Conference on Wastewater Treatment and Modeling[C]. Cham: Springer, 2017.
- [4] Ødegaard H. Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process[J]. *Water Sci Technol*, 2006, 53(9): 17-33.
- [5] 栾志翔,李志伟,王江宽,等. 北方某污水处理厂抗氯离子冲击效果分析[J]. *给水排水*, 2020, 46(1): 32-38.
- Luan Zhixiang, Li Zhiwei, Wang Jiangkuan, *et al.* Effectiveness analysis of anti-chloride ion shock in a wastewater treatment plant in northern China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(1): 32-38 (in Chinese).
- [6] 黄青,周家中,吴迪,等. Bardenpho 镶嵌 MBBR 工艺用于北方某污水厂抗冲击性能[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(6): 1698-1704.
- Huang Qing, Zhou Jiazhong, Wu Di, *et al.* Study on the shock-loading resistance of Bardenpho-embedded MBBR process in a WWTP of northern China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(6): 1698-1704 (in Chinese).
- [7] 周祯领,吴迪,韩文杰,等. MBBR 镶嵌氧化沟在某污水处理厂提标效果分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(17): 1-6.
- Zhou Zhenling, Wu Di, Han Wenjie, *et al.* Retrofitting effect of oxidation ditch embedded with MBBR in a wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(17): 1-6 (in Chinese).
- [8] 肖宁,吴辰平,吴迪,等. 新疆某污水厂氧化沟工艺 MBBR 改造效果分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(21): 11-16.
- Xiao Ning, Wu Chenping, Wu Di, *et al.* Retrofitting effect of oxidation ditch process by MBBR in a wastewater treatment plant in Xinjiang[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(21): 11-16 (in Chinese).
- [9] 滕良方,吴迪,郑志佳,等. 某污水厂 Bardenpho - MBBR 准IV类水提标改造分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 33-39.
- Teng Liangfang, Wu Di, Zheng Zhijia, *et al.* Upgrading and reconstruction to meet quasi class IV standard of surface water by Bardenpho - MBBR in a wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(11): 33-39 (in Chinese).
- [10] 霍克影,周家中,周浩然,等. 某工业废水处理厂提标改造工程设计及运行效果[J]. *净水技术*, 2020, 39(1): 19-23, 68.
- Huo Keying, Zhou Jiazhong, Zhou Haoran, *et al.* Design and operation performance of upgrading and reconstruction project for an industrial wastewater treatment plant [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(1): 19-23, 68 (in Chinese).
- [11] 吴迪,周家中,郑志佳,等. MBBR 用于山西某污水厂提标改造效果分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(15): 6-11.
- Wu Di, Zhou Jiazhong, Zheng Zhijia, *et al.* Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP in Shanxi Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(15): 6-11 (in Chinese).
- [12] 方土,周家中,吴迪,等. 长三角地区某污水处理厂准IV类水提标改造分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(17): 94-99.
- Fang Tu, Zhou Jiazhong, Wu Di, *et al.* Analysis on upgrading and reconstruction of class IV surface water in a wastewater treatment plant in Yangtze River Delta Region[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(17): 94-99 (in Chinese).
- [13] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, *et al.* Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria [J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 504-509.
- [14] 郑志佳,白华清,孟涛,等. 低温下 MBBR 强化硝化原理分析和应用[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(23): 6-11.
- Zheng Zhijia, Bai Huaqing, Meng Tao, *et al.* Principle analysis and application of MBBR enhanced nitrification at low temperature [J]. *China Water & Wastewater*,

- 2019,35(23):6-11 (in Chinese).
- [15] 汪传新,龚灵潇,彭永臻. 低温下 MBBR 处理低碳氮质量比生活污水的同步硝化反硝化特性[J]. 中南大学学报:自然科学版,2014,45(8):2920-2927.
Wang Chuanxin, Gong Lingxiao, Peng Yongzhen. Characteristics of simultaneous nitrification-denitrification in MBBR treating domestic sewage with low C/N ratio at low temperature[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(8): 2920-2927 (in Chinese).
- [16] 栾志翔,吴迪,韩文杰,等. 北方某污水厂 MBBR 工艺升级改造后的高效脱氮除磷效果[J]. 环境工程学报,2020,14(2):333-341.
Luan Zhixiang, Wu Di, Han Wenjie, et al. Effect of high efficiency nitrogen and phosphorus removal in a wastewater treatment plant in north China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 333-341 (in Chinese).
- [17] 郭莉芳,朱宇峰,滕良方,等. MBBR 用于南方某污水厂强化脱氮效果分析[J]. 中国给水排水,2020,36(5):1-7.
Guo Lifang, Zhu Yufeng, Teng Liangfang, et al. Analysis of denitrification efficiency of a wastewater treatment plant in south China enhanced by MBBR [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(5): 1-7 (in Chinese).
- [18] Mases M, Dimitrova I, Nyberg U, et al. Experiences from MBBR post-denitrification process in long-term operation at two WWTPs [J]. Proc Water Environ Federation, 2010(7):458-471.
- [19] Johnson C H, Page M W, Blaha L. Full scale moving bed biofilm reactor results from refinery and slaughter house treatment facilities[J]. Water Sci Technol, 2000, 41(4/5):401-407.
- [20] 刘洋,陈晓华, R Lemaire. 自养脱氮 ANITA™ Mox MBBR 与 IFAS 运行启动经验[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22):38-42.
Liu Yang, Chen Xiaohua, R Lemaire. Experience from start-up, operation of autotrophic nitrogen removal by ANITA™ Mox MBBR and IFAS [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 38-42 (in Chinese).
- [21] 管勇杰,吴迪,周家中,等. NAUTO™ 自养脱氮工艺接种启动及稳定运行控制[J]. 中国给水排水,2019,35(7):27-32.
Guan Yongjie, Wu Di, Zhou Jiazhong, et al. Start-up by inoculation and stable operation control of NAUTO™ autotrophic denitrification process [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7): 27-32 (in Chinese).
- [22] 许敏,刘梦男. 改良型氧化沟扩容改造 AAO-MBR 工艺工程设计[J]. 中国给水排水,2020,36(2):48-52.
Xu Min, Liu Mengnan. Design of AAO-MBR process for modified oxidation ditch expansion [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 48-52 (in Chinese).
- [23] 孙子惠,王静,魏垒垒,等. 山东省某污水处理厂升级改造设计及调试运行[J]. 中国给水排水,2013,29(4):39-42.
Sun Zihui, Wang Jing, Wei Leilei, et al. Design and commissioning operation of upgrading and retrofitting project in a wastewater treatment plant in Shandong [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4): 39-42 (in Chinese).



作者简介:周家中(1990-),男,河北张家口人,硕士,工程师,主要从事水处理强化脱氮除磷技术的研究,具体包括 MBBR、自养脱氮工艺等。

E-mail:zhoujiazhong@qdspr.com

收稿日期:2020-05-18