

MBBR 在国内的工程应用与发展前景

吴 迪

(青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266500)

摘 要: 典型的 MBBR 工艺系统包括悬浮载体、拦截筛网、流化系统(曝气、搅拌推流等), 整个系统通过优化设计, 实现填料的流化与拦截。国内 MBBR 典型工程应用具有强化脱氮除磷、负荷高、占地省、抗冲击负荷能力强、耐受低温等极端水质、可持续升级、投资省、运行费用低等特点。MBBR 采用镶嵌式改造, 曝气方式灵活, 项目实施周期短, 运行管理方便, 广泛应用于市政和工业废水处理, 应用时不受规模限制。悬浮载体生物膜具有生物选择功能, 水力剪切、DO 与微生物量及菌落变化密切相关; 泥膜复合 MBBR 工艺, 一定程度上克服了传统活性污泥法中脱氮除磷泥龄的矛盾, 突破了传统活性污泥法中好氧、非好氧池容比例限制。MBBR 改造形成了多条技术路线, 根据具体情况选择最合理方式, 强化生物脱氮除磷。MBBR 的多种池型, 包括循环流动池型、微动力混合池型、完全混合池型等, 满足绝大多数项目改造需求。MBBR 微生物选择性以及工艺镶嵌的特点, 让 MBBR 可作为新技术的载体和工程化平台, 具有广阔的应用前景。

关键词: 移动床生物膜反应器; 泥膜复合工艺; 硝化螺旋菌; 脱氮除磷; 同步硝化反硝化; 反硝化除磷菌; 厌氧氨氧化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)16-0022-10

Application and Development Prospect of MBBR in China

WU Di

(Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266500, China)

Abstract: A typical MBBR process includes suspension carriers, interception screen, fluidization system (aeration, agitation, etc.). The entire system is optimally designed to achieve fluidization and interception of the filler. Typical applications of domestic MBBR projects have the characteristics of enhanced nitrogen and phosphorus removal, high load and low occupying, strong impact resistance capacity, tolerance to extreme temperatures such as low temperatures, sustainable upgrading, investment savings, and low operating costs. MBBR adopts inlaid retrofitting, flexible aeration, short project implementation cycle, convenient operation and management, and is widely used in municipal and industrial wastewater treatment without restriction on treatment capacity. Suspension carrier biofilm has advantages such as biological selection function, hydraulic shear, close relation of DO to microbial biomass and colony changes. Sludge-membrane composite MBBR overcomes the conflict existed in sludge age difference between nitrogen removal and phosphorus removal in traditional activated sludge process to a certain extent. The limitation of ratio between aerobic and non-aerobic tank volume in the conventional activated sludge process does not exist in sludge-membrane composite MBBR. Through MBBR style retrofitting, many technical routes were formed. In order to strengthen biological nitrogen and phosphorus removal, the most reasonable way should be chosen according to the specific situation. MBBR's various tank types, including the circulating flow tank type, micro-power mixing tank type, and fully-mixed tank

type, could satisfy most project transformation needs. MBBR’s microbiological selectivity and process in-laid features make it be a new technology carrier and engineering platform with broad application prospects.

Key words: MBBR; sludge-membrane composite MBBR; *Nitrospira*; nitrogen and phosphorus removal; SND; DPB; ANAMMOX

移动床生物膜反应器(Moving Bed Biofilm Reactor, MBBR)起源于 20 世纪 80 年代末,是一种新型污水处理技术,旨在强化生化池深度脱氮除磷,实现经济、可持续的稳定达标,广泛应用于污水厂提标、提量改造。自 1989 年挪威 Stensholt 市政污水厂工程首次应用 MBBR 以来,至今全球已有超过 600 座污水处理厂采用 MBBR 工艺^[1]。2000 年初,MBBR 从国外引进国内进行了相关研究和部分项目的使用,受限于当时相关技术不成熟,出现了失败案例,使得 MBBR 工艺的国内推广受阻。直到 2008 年,MBBR 首次成功应用于无锡芦村污水处理厂^[2],突破了 MBBR 实际应用中包括流化与拦截在内的

一系列工程问题,增加了行业对 MBBR 的信心,MBBR 在国内开始大规模推广,应用规模超过 $800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1 MBBR 工艺简介

MBBR 表观上是向反应器中投加悬浮载体作为微生物生长的载体,以强化生化处理效果。其运行方式与活性污泥法类似,附着生物膜的悬浮载体在池中的流动状态与活性污泥法相近,被称为“流动的生物膜”。

根据微生物的存在状态,MBBR 分为纯膜 MBBR 和泥膜复合 MBBR,其特点与传统工艺比较如表 1 所示。

表 1 MBBR 与其他工艺的比较

Tab. 1 Comparison between MBBR and traditional process

项 目	纯膜 MBBR	BAF	泥膜复合 MBBR	传统活性污泥法	MBR
处理标准	一级 A 或 类地表水Ⅳ类标准	一级 A 或 一级 B 标准	一级 A 或 类地表水Ⅳ类标准	一级 A 或 一级 B 标准	一级 A 或 类地表水Ⅳ类标准
微生物生长方式	附着	附着	悬浮 + 附着	悬浮	悬浮
抗冲击性能	强	较强	强	弱	水质较强,水量一般
污泥回流	无回流	无回流	有回流	有回流	有回流
占地面积	小	小	一般	大	小
是否需要泥水分离	需要,气浮或沉淀	不需要,匹配反冲洗系统	需要,沉淀	需要,沉淀	不需要,需有膜池
前序工艺要求	SS < 150 mg/L	SS < 100 mg/L	传统流程	传统流程	膜格栅、膜沉砂池
冲洗或清洗	不需要	需要	不需要	不需要	需要(在线及离线)
操作难易程度	简单	复杂	简单	简单	较复杂,需化学清洗
自控依赖程度	低	高	低	低	一般
投资费用	较高	较高	中	中	高
运行费用	低	中	低	低	高
寿命/a	> 15(系统)	填料需定期补充	> 15(系统)	> 15(系统)	3 ~ 6(膜寿命)

从起源看,早期的 MBBR 专指纯膜 MBBR 工艺,是对传统流化床工艺的改良,通过采用密度与水接近的悬浮载体替代传统的重质填料,节约填料流化的能耗。纯膜 MBBR 系统不设置污泥回流,不进行悬浮态污泥的持留,微生物主要以附着态形式存在于悬浮载体上。欧洲较早使用 MBBR 工艺的污水厂多为新建,采用了纯膜 MBBR。

泥膜复合工艺,又称为 Hybrid、Hybas、IFAS,是将活性污泥法与生物膜法相结合,旨在原位强化活

性污泥系统处理效果,传统方式为增加固定式填料。为克服传统固定式填料易堵塞、传质不良、处理效果差等问题,采用悬浮载体替代传统的填料,出现了泥膜复合 MBBR。泥膜复合 MBBR 既有悬浮态微生物,又有附着态微生物,需要污泥回流。国内推广 MBBR 时正值污水厂升级改造高峰期,多与现有工艺相结合,采用泥膜复合 MBBR。

纯膜 MBBR 所需池容小,水力停留时间更短,能够高效去除 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN,但投资略高,除磷主要

依赖于化学除磷。泥膜复合 MBBR 具有双泥龄,系统同步脱氮除磷效率高,工艺稳定性能更强。两种工艺形式通过合理设计均可达到技术极限处理效果 (LOT)^[3]。

2 MBBR 工艺系统与基本概念

典型的 MBBR 工艺系统包括悬浮载体、拦截筛网、流化系统(曝气、搅拌推流等),整个系统通过优化设计,实现填料的流化与拦截。

① 悬浮载体

悬浮载体是微生物栖息的场所,是生物膜的载体,其性能关系到 MBBR 工艺的效果。悬浮载体密度应接近于水、有效比表面积大、空隙率高,理化参数符合行业标准《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014,以下简称《行业标准》),高密度聚乙烯扁圆柱状悬浮载体(见图1)已成为应用主流,在国外应用超过25年,国内最长也超过10年,取得了良好的效果。

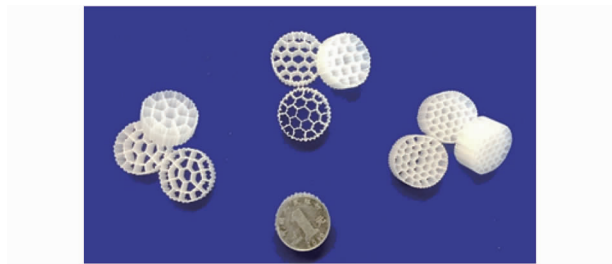


图1 高密度聚乙烯悬浮载体

Fig.1 HDPE suspended carrier

a. 比表面积即自然堆积的悬浮载体单位体积能够为微生物提供挂膜的面积。有效比表面积,即比表面积中能够为微生物挂膜提供保护且传质传氧良好的部分,一般指悬浮载体内部及外部的内凹区域,外部的凸出部分不能作为有效比表面积,传质传氧不能满足要求的区域也不能作为有效比表面积,一般所述的比表面积均指有效比表面积,典型的为 $450 \sim 1\,200 \text{ m}^2/\text{m}^3$,《行业标准》列出了常见悬浮载体的相关参数,作为界定标准。

b. 表面负荷又称膜面负荷,即单位有效表面积单位时间内能够降解的污染物量。作为悬浮载体投加量的设计参数,《行业标准》对其有明确规定:在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,硝化负荷 $>0.5 \text{ gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,有机物负荷 $>10 \text{ gCOD}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。同时还给定了测定条件及方法。在实际工程中, $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时硝化负荷典型值为 0.5

$\sim 1.2 \text{ gN}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,取值受有机物浓度、出水浓度、溶解氧、反应分级、pH 值、抑制性物质等多种因素影响,宜根据工程经验取值或现场实测^[4]。

c. 材质上综合考虑材料密度、耐老化性、耐候性、热塑精密性、抗压、压缩回弹、耐磨性等,应选用纯 HDPE 作为悬浮载体材质;外观设计上,以空心圆柱状为代表的悬浮载体工程实践效果好。

d. 填充率即悬浮载体投加量(按自然堆积立方数计)占悬浮载体投加区域池容的比例。填充率不是设计参数,只作为流化、能耗、可持续升级的校核参数。从流化角度考虑,一般要求填充率 $<67\%$;从运行能耗及运维管理角度考虑,一般要求填充率 $>15\%$,最好在 30% 以上;从今后进一步提标提量角度考虑,填充率应控制在 $30\% \sim 45\%$,为提标提量留有一定余地。当填充率过大,可扩大填充区域池容,反之亦然;或者通过更换具有不同有效比表面积的悬浮载体,实现填充率的增减^[4]。

② 拦截筛网

拦截筛网功能上与格栅类似,对确定尺寸的悬浮载体能够有效拦截,防止悬浮载体流失。拦截筛网一般采用不锈钢材质,制作工艺及产品形式较多,样式上包括冲孔板、栅条等,形状上包括平板型、滚筒型等。对于拦截筛网,最大挑战即是堵塞。水中纤维、毛发均可能在筛网处缠绕,逐步降低过水面积,轻则形成水位差,重则悬浮载体会翻越筛网或致筛网垮塌,需配合流化设计,防止筛网污堵。拦截筛网污堵本质上属于悬浮载体流化问题,也是 MBBR 工艺避免失败的最关键问题。

③ 流化系统

理想状态下的流化是悬浮载体能在生化池内均匀分布。实际工程中,只要能够满足悬浮载体在池内不产生堆积,也不成团运动,而是相对均匀在池内分散,能够满足悬浮载体微生物传质传氧要求,即可认为流化均匀。流化是 MBBR 技术核心所在,也是 MBBR 区别于其他工艺的最本质特征,一方面流化承担起生物膜的传质传氧,是 MBBR 效果表达的关键;另一方面悬浮载体流化是避免悬浮载体堵塞和筛网堵塞的唯一途径。流化设计需要水力模型辅助,或者拥有丰富的水力学工程经验方能满足要求。流化设计还需考虑曝气系统的布置形式、池型设计、进出水设计、悬浮载体填充率等,设备上具体包括曝气系统、进出水系统、导流、推流搅拌器等。搅拌应

采用低速搅拌器及香蕉型搅拌叶片,外形轮廓线条柔和,不损坏悬浮载体。曝气主要采用穿孔曝气管进行布局,也可与微孔曝气结合。

悬浮载体和流化二者相互影响。流化过程中悬浮载体会发生碰撞,因此要求悬浮载体抗压、耐磨、回弹良好且寿命长;同时,悬浮载体密度应设计合理,以减小流化能耗。悬浮载体有效比表面积越高,流道往往越狭窄,对流化要求越高。

3 MBBR 工艺特点

3.1 应用特点

① 强化脱氮除磷。泥膜复合工艺能够实现氮磷的同步强化去除。例如,山东某污水厂提标采用 Bardenpho 五段 + MBBR 工艺,出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 由 1.55 mg/L 降至 0.54 mg/L,氨氮去除率高达 99.3%,出水 TN 由 23.23 mg/L 降至 8.04 mg/L,去除率提高 23.5%,突破原有 A^2/O 工艺对 TN 去除的限制^[5,6]。

② 负荷高,占地省。绝大多数案例均实现了原池提标,甚至是跨级提标、提量、提标同时提量,提量可超过 100%。王晓云等^[7]采用两级 MBBR 串联工艺处理某半导体厂有机生产废水,在容积负荷为 $12.5 \text{ kgBOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、总 HRT = 12 h、滤料填充率为 30% 的条件下,COD 去除率可达 60% ~ 85%;MBBR 除污效率和负荷率均显著优于普通活性污泥法。

③ 抗冲击负荷能力强。由于 MBBR 微生物中,尤其是硝化菌群,有部分或全部以附着态存在,硝化菌群受冲击影响小,能够抵抗较强的冲击,且在超过设计负荷(含变化系数)冲击后,能够快速恢复效果。钱晓辉等^[8]采用 MBBR 处理化工园区废水,当进水 COD 从 130 mg/L 剧增至 845.5 mg/L 时,出水 COD 从 97.1 mg/L 升至 132.1 mg/L,之后一直平稳;当水量从 $15\,971 \text{ m}^3/\text{d}$ 升至 $27\,891 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,出水 COD 自 80.5 mg/L 升至 119.1 mg/L,之后一直平稳,表明 MBBR 进水水量、水质变化剧烈时仍能保持较好的出水水质。

④ 耐受低温、贫营养、高毒性、高氯离子等极端水质。MBBR 生物膜泥龄长,一般超过 30 d,有利于硝化菌群的富集,尤其是有利于特殊水质条件下相关高效菌种的筛选;北方、长江沿线污水厂饱受低温困扰,MBBR 可实现 6℃ 下低温处理,最低可实现 3℃ 低温处理。此外,MBBR 可用于 C/N 值较低的污水处理或微污染水处理,如用于二沉池出水的深

度处理,强化 TN 去除;沿海城市海水倒灌,污水氯离子含量高,MBBR 可满足氯离子浓度超过 5 000 ~ 10 000 mg/L 的脱氮处理。

⑤ 可持续升级。由于 MBBR 所用悬浮载体有不同的有效比表面积及填充率,可通过悬浮载体换代或投加量的增加实现污水厂的升级改造,填充率可在 10% ~ 68%。山东某污水厂 2010 年进行一级 A 提标改造,采用 MBBR 的 SPR - I 型悬浮载体,2015 年原池提量时增加了悬浮载体,实现了原池提量 22%^[9]。

⑥ 投资省。MBBR 投资主要来源于悬浮载体,而悬浮载体的用量与水量、水质、出水标准、温度等多种因素相关,MBBR 吨水投资指标规律性较弱,市政污水从 100 ~ 800 元/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 不等,典型值为 200 ~ 500 元/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$;且寿命超过 15 年,无需更换悬浮载体,无后续追加费用。

⑦ 运行费用低。MBBR 悬浮载体流化无需额外曝气,正常曝气即可满足悬浮载体流化要求,且随着悬浮载体填充率的提升,悬浮载体对气泡有切割作用能够增大气液接触面积,悬浮载体的存在延长了气泡的逸出时间,提高了氧转移效率,降低了曝气能耗;优化池型可省去循环流动池型中的推流器,进一步降低运行能耗^[5,6]。

3.2 MBBR 改造特点

① 镶嵌式改造。通过泥膜复合 MBBR 工艺的实施,MBBR 可以与 A^2/O 、SBR、氧化沟、BIOLAK 以及上述活性污泥工艺的变形工艺相结合,实现镶嵌式改造,无需新建和扩建。

② 曝气方式灵活。主要采用穿孔管曝气,同时也可与微孔曝气、悬链曝气相结合,不影响工艺使用。

③ 项目实施周期短。由于施工安装简单,一般每组池子在 7 ~ 14 d 即可完工,MBBR 改造土建量少甚至没有,MBBR 组件多为预制,可直接安装,可实现不停水改造。

④ 运行管理方便。MBBR 应用,贯彻了镶嵌的理念,能够延续已有运行人员对工艺的运行管理经验,且工艺无特殊维护需求,运行管理简单。

目前国内地下污水厂主流工艺为 MBR 与 MBBR,但 MBR 投资成本可达 MBBR 的两倍且运行维护繁琐。此外,MBBR 通过填料的追投可解决地下污水厂升级的难题,由于原池可实现提标提量,建设

时不需预留远期土建,节约初期投资成本,兼具环保效益与长期经济效益。此外,基于 MBBR 的一体化设备具有能够适应分散污水处理特点,占地省、耐冲击、耐低温、污泥产量低、运行维护简单等,在部分地区已开始应用,取得了良好效果^[10]。

4 MBBR 生物膜机理

4.1 悬浮载体生物膜与传统生物膜

MBBR 与传统的生物膜法(如 BAF)有显著不同,一是 MBBR 为完全连续流,在悬浮载体流化过程中,于水力剪切的作用下实现生物膜的动态更新;二是 MBBR 仍需泥水分离,采用沉淀或气浮形式,BAF 则有滤池功能;三是 MBBR 生物膜几乎全部为“料上膜”,而 BAF 以“料间膜”为主。从悬浮载体比表面积看,BAF 悬浮载体比表面积 $> 20\ 000\ \text{m}^2/\text{m}^3$ (100% 填充),而 MBBR 悬浮载体比表面积典型值为 $500\ \text{m}^2/\text{m}^3$,50% 填充时相当于 $250\ \text{m}^2/\text{m}^3$,相差 2 个数量级。但是从容积负荷看,BAF 仅比纯膜 MBBR 高不足 10%,造成这种宏观、微观较大差异的原因即生物膜的存在方式不同、性能不同。BAF 工艺中,生物膜发挥作用的是“料间膜”,生长于填料之间,反洗时滤料松动容易脱落,而其中一部分“料上膜”则不易被冲洗,这也是 BAF 反洗后效果支撑的重要组成部分^[11]。而 MBBR 中,生物膜多为“料上膜”。目前,国内外众多学者对于生物膜成膜机理、基质进行了深入研究,但并没有统一的共识,均认为生物膜的性状、菌落组成与 EPS 含量及组成紧密相关,而水力剪切力对微生物中 EPS 含量有重要影响^[12]。

同样,MBBR 生物膜也具有传统生物膜的一些特点,如污泥龄长(可达到 30 d 以上),生物相更加丰富,抗冲击能力强,但受传质影响大等。

4.2 悬浮载体生物膜微生物菌落

泥膜复合系统表面上是工艺布置的变化,本质上是改变了系统的微生物菌落结构。针对国内多个污水厂进行微生物菌落分析发现,单纯活性污泥系统硝化菌群的优势菌种为亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas* sp.)和硝化螺旋菌(*Nitrospira*),占比分别为 1.0% ~ 3.5%、1.5% ~ 2.5%;而泥膜复合系统中,活性污泥部分的 AOB 占比有所降低,NOB 占比有所升高,而生物膜部分的占比分别为 5% ~ 10%、8% ~ 30%,硝化菌群总占比一般在 10% ~ 32%,且硝化效果越好的污水厂,*Nitrospira* 占比越高、*Nitro-*

somonas sp. 占比越低;运行时间越长的污水厂,硝化菌群占比就越高。最新研究^[13~15]表明,*Nitrospira* 兼具 AOB 和 NOB 功能,其比生长速率低,对基质的亲和力更强,在氨氮浓度较低的环境中更具优势,可作为高排放标准污水厂稳定运行的指示性微生物。对于一般活性污泥系统,当硝化菌群占比为 2% ~ 5% 时,系统可获得较为稳定的硝化效果,而污水厂冬季氨氮不达标的主要原因在于冬季硝化菌群生长较慢,所需泥龄较长,硝化菌群占比降低。悬浮载体的投加,一方面,成熟悬浮载体其生物膜总硝化菌群占比可达 10% 以上;另一方面,随着生物膜的动态更新,脱落的生物膜进入活性污泥,可对活性污泥进行硝化接种。

同时,在悬浮载体中也检出大量的反硝化菌,大多占比在 6% ~ 20%,与水厂运行条件有关,也有个别项目反硝化菌占比超过了 50%,是悬浮载体 SND 现象的微观证据。悬浮载体除了对硝化类菌群强化以外,也有较多优势菌群尚无法界定作用,如酸杆菌门占比往往显著高于活性污泥系统,在 10% ~ 20%,部分优势种群 Gp4、Gp6、Gp10 等几乎全部来自于悬浮载体,活性污泥中几乎未检出^[16]。

生物量上,一般悬浮载体生物膜 VSS/SS $> 90\%$,与进水水质、工艺、悬浮载体投加位置等因素相关。综合考虑活性污泥的 VSS/SS、污泥浓度等,国内 MBBR 系统内悬浮载体对系统硝化的贡献率超过 70%^[16]。

综合微生物菌落的分析发现,生物膜不是简单的活性污泥的复制和放大,对微生物富集具有一定的选择性,更有利于长泥龄菌群的富集,对污水处理具有重要意义。

4.3 悬浮载体生物膜与活性污泥

活性污泥系统属于间歇性培养系统,各类菌群混合,只在特定功能区内代谢和增殖,在不适宜功能区一般处于抑制状态。泥膜复合 MBBR 工艺,由于悬浮载体投加于特定区域,如缺氧区或好氧区,对于悬浮载体是连续性培养系统,能够富集专性菌群,强化硝化或反硝化效果。若悬浮载体投加于好氧区,富集硝化菌群,则可破解传统活性污泥法好氧与非好氧池容比例的限制,能够通过不扩建,仅在原池内进行功能区的重新划分,如切割部分好氧用于弥补缺氧池容不足,好氧区硝化不足部分通过投加悬浮载体予以补足,实现原池改造。同时,悬浮载体的投

加,也破解了传统活性污泥法硝化长泥龄菌群与短泥龄聚磷菌群和反硝化菌群对于泥龄矛盾的限制。悬浮载体为长泥龄自养菌提供了生长空间,悬浮态泥龄可相应缩短,能够实现同步强化脱氮除磷。悬浮载体对于硝化的强化,在于直接富集自养菌;对于反硝化的强化,在于突破池容比例限制,扩大缺氧池容;对于除磷的强化,在于解除污泥龄的限制,通过缩短悬浮态泥龄,满足除磷泥龄需求。

对于泥膜复合系统,悬浮态的泥与附着态的膜是竞争与合作的关系。对于活性污泥,有效比表面积大,基质浓度并非其限制性因素,对基质的争夺能力强,但泥龄受限,一般不超过 20 d;对于生物膜法,基质传质是核心限制性因素,泥龄长,一般可超过 30 d。合作是强化处理效果,竞争即泥与膜对于基质浓度的争夺。当悬浮载体投加于好氧区中段时,夏季水温较高,硝化所需泥龄短,一般可在好氧前端即完成大部分硝化过程,而悬浮载体处于中段,此时基质浓度已然降低,加之对基质争夺能力不如污泥,所以体现出污泥在硝化过程中起主导作用。冬季水温较低,硝化所需泥龄长,一般在好氧前端硝化程度低,大量基质进入填料区,污泥硝化能力弱,此时体现出悬浮载体在硝化过程中起主导作用。把握泥膜之间的本质与关系,工程中合理设计悬浮载体区域及悬浮载体投加位置,是泥膜复合工艺设计的主题。

泥膜复合工艺较强的抗冲击负荷能力,本质上还是源于悬浮载体对自养菌的固定化技术。冲击的最终本质原因是自养菌受到抑制以及占比逐步降低,而泥膜复合系统中自养菌主要以附着态存在得以固定,对短期冲击抵抗能力显著增强。

4.4 悬浮载体生物膜与DO

因悬浮载体上微生物以生物膜形式存在,MBBR 动力学特性与生物膜法较为接近。对于活性污泥法,当 $DO > 2 \text{ mg/L}$ 时,反应速率与 DO 呈零级反应,即提高 DO 无法提高反应速率;而生物膜法,依靠基质梯度进行传质传氧,DO 与反应速率呈一级反应,即提高 DO 可提高反应速率。这种特性一方面有利于提高系统抗冲击负荷能力,当冲击来临时,更高的 DO 具有更高的降解速率,保证出水达标;另一方面,设计时若占地极为紧张,可考虑更高的设计 DO 值,获得更大的处理负荷。对于 MBBR 系统,生物膜厚度、DO 水平、曝气强度之间相互影响。曝气

强度大,生物膜受水力剪切作用大,生物膜变薄;反之,曝气强度小,生物膜受水力剪切作用小,生物膜增厚;DO 水平高,溶解氧穿透能力强,生物膜变厚;反之 DO 水平低,溶解氧穿透能力减弱,生物膜变薄;而曝气强度与 DO 紧密关联,往往曝气强度大,DO 随之增大。运行中,应紧密把握曝气强度与 DO 控制。

对于 MBBR,传统认为生物量越大则处理负荷越高。但对于尺寸一定的悬浮载体,生物量增大则意味着生物膜增厚,不仅增大了传质难度,还降低了有效比表面积,进而影响处理负荷^[17]。随着对 MBBR 生物膜机理的进一步认知了解到,处理负荷的限制性因素是比表面积和传质,单纯增大生物量意义不大,反而可能引起生物膜内部厌氧,造成生物膜脱落,从而影响处理效果。结合对 MBBR 系统微生物菌群的分析,悬浮载体发挥的并非单纯增量作用,而是微生物选择性。部分对于悬浮载体进行改性,包括表面电荷改性,仅仅是考虑大多数微生物表面带负电,通过正电改性以增加生物量^[18],但并未分析改性载体对微生物选择性的变化,而微生物选择性恰恰是 MBBR 最大的优势之一,相关研究还需进一步深化。

同时,由曝气产生的水力剪切也对生物膜胞外聚合物的浓度有重要影响,是改变 EPS 的重要诱因,适宜的水力剪切对生物膜的密实性及粘附性也有重要影响。一般穿透 $100 \mu\text{m}$ 生物膜厚度 DO 会降低 $1 \sim 2 \text{ mg/L}$,故一般条件下,最佳生物膜厚度为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 。

国内 MBBR 系统中采用最多的是穿孔管曝气方式,而一般行业共识即穿孔管曝气氧转移效率低,可能造成 MBBR 能耗高的情况。设计中为保证穿孔管曝气具有良好的氧转移效率,通常填充率为 $30\% \sim 60\%$,最大不超过 67% 。改变填充率的方式包括改换比表面积更高的悬浮载体,如相对于 $620 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的悬浮载体,选择 $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 悬浮载体体积可下降 22.5% ;也可通过增大或减小填充区域改变填充率。

4.5 悬浮载体生物膜与反硝化

已有的工程实践^[19]表明,缺氧区投加悬浮载体确实有助于提高反硝化速率,但需进行能耗、物耗的全面核算,选择最优方案。提高反硝化的措施除了在缺氧区直接投加悬浮载体之外,通过扩大缺氧池

容,在缩小的好氧池容内投加悬浮载体也是工程中的常用手段^[2]。从分子生物学角度,悬浮载体与活性污泥系统中的优势反硝化菌群不同,部分高效反硝化菌比生长速率并不高,这可能为缺氧悬浮填料技术的应用提供了可能性。纯膜 MBBR 反硝化系统的反硝化速率远远高于活性污泥法,外投碳源时容积负荷超过 $0.6 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,可替代反硝化滤池的反硝化功能,占地紧凑,效率高。

此外,悬浮载体生物膜的分层分布结构,为同步硝化反硝化(SND)的出现提供了可能性,而分子生物学研究结果(好氧悬浮载体上存在近 20% 的反硝化菌群)也提供了微观证据。对于活性污泥系统,SND 的控制关键即 DO,一般要求 DO 为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$,而 MBBR 中因生物膜的存在,控制更高的 DO 仍能达到 SND 效果。对于 SND 现象的产生,碳源来源是重要的研究对象。在好氧区,碳源含量极低,且生物膜表层多为异养好氧菌,能够快速降解残余碳源,推测生物膜内部缺氧区的碳源来自于生物膜本身。生物膜的粘附性与 EPS 相关,随着生物膜老化,EPS 有逐步增大趋势^[20],这可能为内部的反硝化菌提供了碳源。虽然运行中已逐步实现了对 SND 效果的定量控制,但设计过程中,为确保能够稳定达标,悬浮载体的 SND 效果往往未纳入考虑,仍按传统硝化反硝化进行设计,SND 效果的出现作为降低内回流、减少碳源投加的增效措施,随着对 SND 现象的进一步研究,SND 逐步纳入设计中,能够进一步降低污水厂改造费用和运行费用,提高效率。

5 MBBR 改造技术路线与改造池型

5.1 MBBR 提标技术路线

对于污水厂的升级改造,不论是一级 A 还是准 IV 类水,面临的首要问题即 C、N、P 去除功能段的确立及整体流程的设计,而营养元素回归生化,充分发挥生化脱氮除磷功能是目前阶段的较优选择。一方面,生化池是水厂内最大的单体构筑物,挖潜空间巨大;另一方面,生化功能合一便于控制,有利于基质(如碱度)平衡。同时,减轻深度处理负荷,最大程度发挥生物除磷功能。

分析国内 MBBR 升级改造,具有的共同特征即在原池基础上改造,深入挖掘现有构筑物处理潜能,但具体形式及着眼点不同,主要形成了如图 2 所示的技术路线。

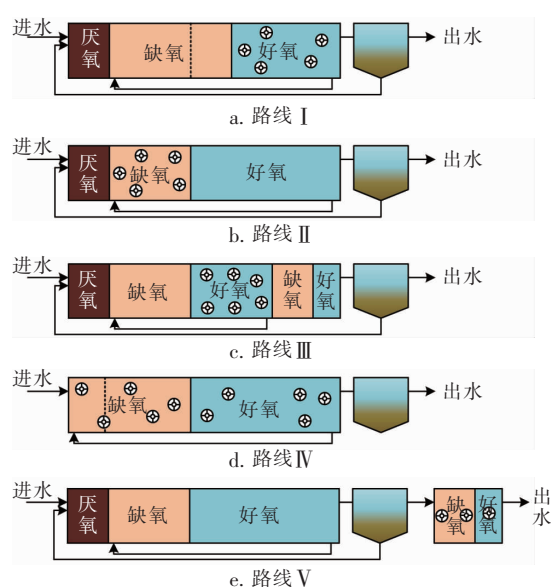


图2 MBBR 升级改造路线

Fig. 2 MBBR upgrading route

技术路线 I,采用泥膜复合 MBBR 工艺,优先满足反硝化池容,切割部分好氧池容用于反硝化,好氧池容不足的部分通过投加悬浮载体予以补足。该技术路线适用于大多数污水厂一级 A、准 IV 类水升级改造的情况,一般 TN 去除率可达到 70% 以上。

技术路线 II,采用泥膜复合 MBBR 工艺,缺氧池投加悬浮载体,好氧池根据情况选择是否投加。由于缺氧投加悬浮载体,搅拌能耗将有所提升,一般不作为首选。该技术路线更适用于好氧池不便改造(如氧化沟表面曝气),或按技术路线 I 核算好氧全池投加悬浮载体超过填充率要求(填充率 $> 67\%$)情况。

技术路线 III,采用泥膜复合 MBBR 工艺,维持原厌氧池容,好氧池容划分为好氧填料区、后缺氧区、后好氧区,形成五段 Bardenpho 结构,突破了传统 A^2/O 工艺回流比对 TN 去除率的限制,TN 去除率可达到 90% 以上,满足准 IV 类水对于 TN 严格的出水要求;技术路线 III 与技术路线 I 的思路大体相同,均突破了好氧池容与非好氧池容的比例限制,核心差别是增大的缺氧池容前置或后置;技术路线 III 适用于对 TN 去除率要求较高的情况。

技术路线 IV,也称作纯膜路线,采用纯膜 MBBR 工艺,缺氧、好氧池同时投加悬浮载体,强化处理效果;技术路线 IV 和技术路线 II 相比,不再采用泥膜复合 MBBR 形式,不持留活性污泥,系统对污染物去

除完全依赖悬浮载体的生物膜,是单纯的生物膜工艺;纯膜工艺优势是占地省、污泥产量低、特殊水质处理效果好、碳源利用率高等^[21],但对预处理有一定要求。目前,纯膜工艺主要应用于一些工业废水处理工程项目。

对于部分污水厂,生化池运行良好,且具有一定的空间新建,由于纯膜 MBBR 负荷高、占地省,可考虑采用纯膜 MBBR 作为生物处理的强化措施,在上述基本技术路线基础上形成了技术路线 V。

在技术路线选择上,一般先根据实际情况确定采用泥膜复合 MBBR 工艺或纯膜 MBBR 工艺,确定是否采用技术路线 V;如果采用泥膜复合 MBBR 工艺,再根据 TN 去除率要求,选择技术路线 I 或技术路线 III,计算出所需生物膜面积后,校核好氧区填料填充率是否满足要求,若不满足再考虑技术路线 II。总之,MBBR 改造技术路线的选择,应置于污水厂综合技术路线框架之下,优先考虑原池改造、优先考虑原生生化池内完成脱氮除磷,综合比较各类方案,实现最优的改造投资和运行消耗。

5.2 悬浮载体投加区域池型

根据投加区域,悬浮载体有全池投加、局部投加等形式,相应池型上国内应用的主要有以下三种:

① 循环流动池型。该池型主要用于 A^2/O 及其变形工艺或氧化沟工艺的改造,包括局部或全池投加悬浮载体。循环流动池型即在悬浮载体投加区域增加推流器,增加导流墙,拆除一小段隔墙,将原来的推流式改为循环流动式,填料在曝气、推流器的综合带动下,实现流化。目前,国内采用此类池型的工程项目超过 60 项,水量超过 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;循环流动池型的优点是安全可靠、适用范围广,若原池型为氧化沟可完全省去土建,只需要安装 MBBR 工艺组件(如曝气、拦截筛网等),但由于需要推流器,其能耗约占生化池总能耗的 5% ~ 10%,需要进一步优化。

② 微动力混合池型。与循环流动池型相比,微动力混合池型省去了推流器,通过对池内进出水流态、曝气、池型的综合设计,实现填料在池内流化。由于不再采用推流器带动流化,故称为微动力混合池型。微动力混合池型的优点是节能,局限性是对于填料投加区域的几何尺寸等有特殊要求,但通过投加区域的合理规划,可满足绝大多数升级改造的池型要求,适用范围广。目前采用此类池型的项目

超过 10 项,处理水量超过 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,运行可靠稳定。

③ 完全混合池型。该池型主要用于 SBR 及其变形工艺的改造,池内为完全混合式,一般需要综合设计曝气、筛网及搅拌。

6 存在问题与应用展望

尽管 MBBR 在国内推广 10 余年,取得了一定的成绩,但仍存在一些问题需进一步研究。

① 悬浮载体流化仍是定性概念,缺乏定量参数。流化均匀性只能通过肉眼识别,这为 MBBR 纳入自控体系增大了难度;学者们通过采用曝气强度、气水比、最低流化曝气量、完全流化曝气量等概念予以解释流化,但均难以广泛适用。

② 悬浮载体流化,对于好氧区,属于气、液、固(载体)、固(污泥)多相流,水力模拟难度大,缺乏水力模型的建立。

③ 泥膜复合工艺中泥膜的动态关系需要进一步理解,对于不同情况下匹配最优控制方案,实现水质稳定基础上的节能降耗。

④ 部分污水厂预处理设施不完善,纤维毛屑、砂石等对悬浮填料拦截筛网构成威胁。虽然 MBBR 系统设计时充分考虑了这些因素,并通过水力学条件优化以防筛网堵塞或破损,但任何措施均在给定条件下方能实现,一旦进水大范围超过设计预期,可能造成筛网磨损加剧呈几何级数增长,造成筛网寿命不如预期。对进水充分调研,以及对筛网材质进行进一步研究,选用耐用材料或合理壁厚,是工程中需要注意的问题。

⑤ MBBR 是涉及到水力学、微生物学、材料学的交叉学科,水力学的流化控制、微生物学的菌落特征、材料学的载体材质均需要进一步研究。从宏观的生物膜厚度、生物量到微观的微生物菌落、挂膜机理,对悬浮载体生物膜的认识都有待进一步挖掘,对工艺本质的认知需进一步深化。

但 MBBR 这种微生物选择性以及工艺镶嵌的特点,让 MBBR 可作为新技术的载体和工程化平台,具有广阔的应用前景。污水厂经过提标改造后,下一个目标则是提效,具体内容就是节能和降耗,而具备节能降耗的典型工艺,如 SND、DPB^[22]、ANAM-MOX 等,悬浮载体均可作为相关微生物的加载平台。SND 已在优化运行中得以稳定的控制和实现。DPB 实现途径,不论是 A^2/N 还是 UCT,MBBR 均可

作为硝化菌群载体,释放污泥龄,为DPB的实现创造条件。ANAMMOX或CANON等自养脱氮工艺核心即为自养菌,自养菌比生长速率低、易于流失,需要菌种固定化技术予以规避其缺点,实现工程化应用,国内多个成功启动的自养脱氮工艺均采用了MBBR形式^[23]。

另外,MBR的大量应用中,膜污染和堵塞是核心问题,最重要原因在于MBR旨在富集更高污泥浓度提高处理效果,而较高污泥浓度恰恰是膜污染的直接致因。有学者采用MBBR-MBR工艺,利用MBBR提高处理效率,降低反应器内污泥浓度,延缓膜的污染,获得了良好效果^[24]。

7 结语

移动床生物膜反应器是介于活性污泥法与生物膜法之间的一种新型、高效的复合工艺,具有强化脱氮除磷、抗冲击、应用灵活、投资成本低、管理运行简单等优点,广泛适用于污水处理厂升级改造、扩容以及分散式污水处理,具有广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] McQuarrie J P, Boltz J P. Moving bed biofilm reactor technology: Process applications, design, and performance[J]. *Water Environ Res*, 2011, 83(6): 560-575.
- [2] 王翥田, 叶亮, 张新彦, 等. MBBR工艺用于无锡芦村污水处理厂的升级改造[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(2): 71-73.
Wang Zhutian, Ye Liang, Zhang Xinyan, et al. Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(2): 71-73 (in Chinese).
- [3] Kim H, Gellner J W, Boltz J P, et al. Effects of integrated fixed film activated sludge media on activated sludge settling in biological nutrient removal systems[J]. *Water Res*, 2010, 44(5): 1553-1561.
- [4] 吴迪. 水处理用悬浮载体填料行业标准解读与投加量设计[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(16): 13-17.
Wu Di. Interpretation of *High Density Polyethylene Suspended Carrier for Water Treatment* and calculation of added amount of suspended carrier[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(16): 13-17 (in Chinese).
- [5] 杨宇星, 吴迪, 宋美芹, 等. 新型MBBR工艺应用于类地表Ⅳ类水排放标准升级改造[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(14): 93-98.
Yang Yuxing, Wu Di, Song Meiqin, et al. Application of new MBBR in WWTP upgrading to meet class Ⅳ surface water standard[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(14): 93-98 (in Chinese).
- [6] 杨晓美, 宋美芹, 吴迪, 等. 新型悬浮载体强化脱氮除磷技术用于高标准污水处理[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(16): 98-102.
Yang Xiaomei, Song Meiqin, Wu Di, et al. Application of new style suspended carriers enhancing nitrogen and phosphorus removal in wastewater treatment for high standard[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(16): 98-102 (in Chinese).
- [7] 王晓云, 付爱民, 李景. 台湾某半导体企业的废水处理工程实例[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(20): 73-76.
Wang Xiaoyun, Fu Aimin, Li Jing. A project case of treating semiconductor industry wastewater in Taiwan[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(20): 73-76 (in Chinese).
- [8] 钱晓辉, 游亮. 移动床生物膜反应器在化工园区污水处理中的应用[J]. *安徽化工*, 2014, (3): 65-67.
Qian Xiaohui, You Liang. Application of MBBR in wastewater treatment in chemical industry park[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2014, (3): 65-67 (in Chinese).
- [9] 刘浩, 杨俊杰, 于宁. Bardenpho五段法/MBBR用于青岛李村河污水厂三期扩建[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(24): 62-66.
Liu Hao, Yang Junjie, Yu Ning. Design and operation of third-phase expansion project of Qingdao Licunhe WWTP by five-stage Bardenpho and MBBR Process[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(24): 62-66 (in Chinese).
- [10] 张晶晶, 吴迪. 新型MBBR一体化设备用于黑臭水体点源污染治理[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(22): 102-105.
Zhang Jingjing, Wu Di. Application of MBBR in point source control of a black and odorous river[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(22): 102-105 (in Chinese).
- [11] 肖文胜, 徐文国, 杨桔才. 曝气生物滤池中生物膜的活性研究[J]. *北京理工大学学报*, 2003, 23(5): 655-657, 664.
Xiao Wensheng, Xu Wenguo, Yang Jucui. Activity of bi-membranes and bioflocules in biological aerated filters[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(5): 655-657, 664 (in Chinese).
- [12] 陈园园, 彭党聪. 生物膜中EPS与微生物的分布及测

- 定[J]. 中国给水排水,2017,33(15):25-30,35.
- Chen Yuanyuan, Peng Dangcong. Distribution and determination of EPS and microorganisms in biofilm[J]. China Water & Wastewater,2017,33(15):25-30,35(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] van Kessel M A H J, Speth D R, Albertsen M, et al. Complete nitrification by a single microorganism[J]. Nature,2015,528(7583):555-559.
- [15] 姚倩,彭党聪,赵俏迪,等. 活性污泥中硝化螺菌(*Nitrospira*)的富集及其动力学参数[J]. 环境科学,2017,38(12):5201-5207.
- Yao Qian, Peng Dangcong, Zhao Qiaodi, et al. Enrichment of *Nitrospira* in activated sludge and kinetic characterization[J]. Environmental Science,2017,38(12):5201-5207(in Chinese).
- [16] 王瑞,夏文辉,原建光. MBBR+臭氧电磁催化氧化用于污水处理厂提标扩建[J]. 中国给水排水,2017,33(8):86-89.
- Wang Rui, Xia Wenhui, Yuan Jianguang. MBBR+ozonation together with electromagnetic catalytic oxidation for upgrading project of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater,2017,33(8):86-89(in Chinese).
- [17] Sen D, Randall C W, Copithorn R R, et al. The importance of aerobic mixing, biofilm thickness control and modeling on the success or failure of IFAS systems for biological nutrient removal[J]. Water Practice,2007,1(5):1-18.
- [18] 李倩. 改性聚乙烯悬浮载体挂膜及其脱氮性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- Li Qian. Biofilm Formation and Nitrogen Removal Performances of Modified Polyethylene Suspended Carriers[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2015(in Chinese).
- [19] 刘宜龙,吴迪,刘飞,等. MBBR 在工业园区废水处理升级改造中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(17):14-18.
- Liu Yilong, Wu Di, Liu Fei, et al. Application of MBBR in industrial park WWTP upgrading[J]. China Water & Wastewater,2017,33(17):14-18(in Chinese).
- [20] 徐巧. 缺氧反硝化 MBBR 填料生物膜特性及运行条件优化研究[D]. 无锡:江南大学,2016.
- Xu Qiao. Operation Optimization and Biofilm Characteristics of Denitrification MBBR[D]. Wuxi:Jiangnan University,2016(in Chinese).
- [21] 郑志佳,吴迪,宋美芹,等. 移动床生物膜反应器两种不同工艺形式的性能对比[J]. 中国给水排水,2017,33(11):16-21.
- Zheng Zhijia, Wu Di, Song Meiqin, et al. Comparison between two forms of moving bed biofilm reactor[J]. China Water & Wastewater,2017,33(11):16-21(in Chinese).
- [22] 郝晓地,李天宇,吴远远,等. A²/O 工艺用于污水处理厂升级改造的适宜性探讨[J]. 中国给水排水,2017,33(21):18-24.
- Hao Xiaodi, Li Tianyu, Wu Yuanyuan, et al. Discussion on suitability of A²/O process for upgrading of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater,2017,33(21):18-24(in Chinese).
- [23] 李慧博,王银爽,丁娟,等. ANITA Mox 自养脱氮 MBBR 反应器的启动及运行[J]. 中国给水排水,2014,30(5):1-5.
- Li Huibo, Wang Yinshuang, Ding Juan, et al. Start-up and operation of ANITA Mox deammonification MBBR[J]. China Water & Wastewater,2014,30(5):1-5(in Chinese).
- [24] 刘强,王晓昌. 复合式膜生物反应器的膜污染控制机理[J]. 环境科学与技术,2012,35(7):12-15.
- Liu Qiang, Wang Xiaochang. Membrane fouling control mechanism of a hybrid membrane bioreactor[J]. Environmental Science & Technology,2012,35(7):12-15(in Chinese).



作者简介:吴迪(1985-),男,黑龙江伊春人,博士,高级工程师,主要从事水环境恢复理论与技术研究、自养脱氮及 MBBR 工艺研发等工作。

E-mail:hitwudi@126.com

收稿日期:2018-06-08