

自生动态膜生物反应器研究现状^{*}

冉 全 康蓓蓓 刘珍贤 符 露 田 辉

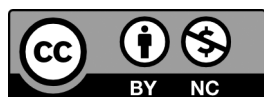
贵州工业职业技术学院化工系, 贵阳

摘 要 | 自生动态膜生物反应器是一种具有很大潜力的污水处理技术。本文介绍了自生动态膜生物反应器的结构和研究现状, 分析自生动态膜生物反应器运行的影响因素, 旨在为自生动态膜生物反应器的研究与推广提供有益的借鉴。

关键词 | 自生动态膜生物反应器; 现状; 因素

Copyright © 2021 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



膜生物反应器被认为是本世纪最有潜力的水处理技术^[1], 是用膜分离技术代替了传统活性污泥法中的重力沉淀池, 将生物处理与膜分离相结合的方法^[2]。与传统活性污泥工艺相比, 膜生物反应器具有固液分离效率高、出水水质好、耐冲击负荷、产生污泥量少、占地面积小、容易实现自动控制等优点, 是一种去除效率高的污水处理技术^[3]。膜组件造价高、运行费用高、膜污染严重, 制约了膜生物反应器在我国的推广应用。自生动态膜生物反应器因其设备简单、操作容易、处理效果较好、费用较低等优点而引起人们的广泛关注^[4, 5]。

^{*} 贵州省联合基金(黔科合 LH 字[2014]7395)。

通讯作者: 冉全, 副教授, 贵州工业职业技术学院。E-mail: ranquanlearn@126.com。

文章引用: 冉全, 康蓓蓓, 刘珍贤, 等. 自生动态膜生物反应器研究现状[J]. 环境与资源, 2021, 3(1): 1-10.
<https://doi.org/10.35534/er.0301001>

1 自生动态膜生物反应器的结构

使用大孔径网膜代替传统的微滤膜,在运行过程中膜表面形成的污泥层起到截留作用,该污泥层在运行过程中在线产生,并不断累积变化,称为动态膜^[6]。动态膜通常被分为两类:预涂动态膜和自生动态膜。预涂动态膜是先用多孔支撑体过滤含有成膜物质的溶液,待动态膜在其表面形成后,再过滤待处理溶液,预涂动态膜的组成物质与被过滤溶液中的物质是不相同的。自生动态膜则是被过滤溶液中的物质在多孔支撑体表面形成的膜^[7]。

1.1 自生动态膜

自生动态膜是指在废水中可以成膜的物质沉积在某种载体上形成动态膜,在污水处理中把活性污泥看作是成膜物质,水也有其它的物质可以作为成膜物质,在食品废水的处理中,把糖物质作为成膜物在陶瓷上形成动态膜^[8]。在自生动态膜的基材研究中应用较多的是筛绢、工业滤布和不锈钢丝网等孔径较大的材料。其作用机理就是在基材的表面沉积小分子粒子来缩小基材的孔径,以达到分离小分子和污泥的目的。基材的性质是形成自生动态膜的关键因素,并对自生动态膜生物反应器的运行效果产生影响。在选择膜的基材时,应当选择机械强度高、化学稳定性高、成本低以及附着性能较强的材料^[9]。

1.2 预涂动态膜

预涂动态膜技术是把膜基材使用天然或者人工合成的有机物或无机物进行预涂层。在预涂层时保证颗粒较大,使得形成的动态孔隙率基本不具有可压缩性,而且渗透性还能增强,提高了操作压力^[10]。在预涂装时常用的基材包括不锈钢丝网、筛绢、普通筛网、工业滤布、陶瓷管等,而涂膜材料有 ZrO_2 、 MnO_2 、高岭土、硅藻土、 TiO_2 等。此外,也有不少研究人员把多价金属水和氧化物溶胶也作为预涂剂。但多价金属水和氧化物溶胶颗粒的表面能过大,不会受错流速度的影响,若是长时间运行就会造成凝聚,缩减通量^[11]。对涂膜效果和水通量的影响因素主要包括涂抹时间、涂膜液浓度、错流速度、预涂剂粒径等。

1.3 动态膜形成结构

动态膜形成会受到影响的因素有流体力学、基材特性、污泥状态等，现在还没有具体的机理来阐述动态膜的形成。Rezvani F 等^[12]提出动态膜的形成一般由 2 个阶段组成，即曝气运行阶段和污泥搅拌阶段。Fan B^[27]等认为动态膜主要是由胶体层和沉积层构成的，胶体层的形成需要较长时间，动态膜的截留作用是胶体层体现的。沉积层形成所需的时间较短，但是阻截效果很差。另外胶体层所具有的附着力很大，在曝气时影响很小，即使受到破坏也能够在下一个循环恢复如初。Liu H 等^[13]认为动态膜是由四个阶段形成的，也与四个经典过滤定律相符合；并且把动态膜分为污染层、基底层以及分离层。Zhang X 等^[28]认为动态膜是由 3 个阶段形成构成的，分别是形成分离层、稳定地生长阶段以及结垢阶段。

2 自生动态膜生物反应器的研究现状

美国学者 OakRidgel^[14]在 1965 年最早对动态膜进行了研究，他在国家原子能所实验室发现了 ZrCl 动态膜具有反渗透效能，之后便开始了对动态膜 DMBR 的研究。日本学者 Kiso Y^[15]等人用尼龙网制作有效面积为 0.12 m² 的动态膜组件，在体积为 25 L 的反应器内进行小试实验，发现在连续进水、出水，连续曝气的条件下，出水的 SS 和 BOD 小于 1.5 mg/L 及 5.0 mg/L；在间歇曝气的条件下 TN 的去除率达 80%，但 1 到 2 周后出现膜阻塞问题；将其运用于 A²O（厌氧/缺氧/好氧）工艺，可达到高效的 TN 去除率，同时连续运行 2 个月无阻塞问题。韩国 Changwon 国立大学的 G.T.Seo^[16]等人用聚丙烯质地的无纺布制作动态膜组件，将 10 片矩形的总有效面积为 2m² 的膜片置于 A/O（厌氧/好氧）工艺的曝气池中进行实验，发现该工艺可高效地处理城市生活污水，平均出水 SS 达 3.2 mg/L，去除率达 93.5%；平均出水 COD 为 13 mg/L，去除率达 91.6%；在控制进水 C/N 比恒定（BOD/N=4.5）的条件下总氮去除率达 66%；磷的去除率相对较低，为 23%。

Chang^[17]等利用无纺布作为分离组件构建 MBR 用于废水处理，实验结果

表明,在进水 COD 800 mg/L–1800 mg/L 变化时,出水 COD 维持在 60 mg/L, SS 维持在 10 mg/L,可见,其抗冲击负荷能力较强。清华大学范彬^[18]等人采用一种 0.1 μm 筛分孔径的筛绢制成平板型过滤组件,与生物反应器构成一体式的动态膜生物反应器 DMBR,对城市生活污水进行处理研究,动态膜 DM 可以将几乎所有的 SS 以及部分的溶解性 COD 或 TOC 截留在生物反应器内。大连理工大学孟志国^[19]采用重力自流式非织造布膜生物反应器处理生活污水,连续运行试验表明:反应器对 COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有较高的处理效率,而且出水无色无味,无 SS; 对比 3 μm 、0.2 μm 、5 μm 的非织造布得出 3 μm 更适合应用于重力自流式非织造布膜生物反应器;在活性污泥浓度为 4000 mg/L 左右情况下,合适的曝气量为 1.0 m^3/h ;水力停留时间不小于 5.4 h,建议最少取 6 h;生物反应器内活性污泥浓度 MVLSS 不高于 9000 mg/L,排泥时间建议取 45 天;出水水质 COD<15 mg/L, BOD_5 <10 mg/L, TOC<3.5 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除 95% 以上, TN 去除 50% 左右。山东大学许春华^[20]对选择的五种基材筛绢(140 目)、筛绢(260 目)、无纺布(75 g/m^2)、无纺布(450 g/m^2)和不锈钢网(140 目)进行不同压力下清水膜通量的比较及对过滤性能的影响试验,结果表明:无纺布(75 g/m^2)由于清水膜通量较小,且表面具有一定程度的疏水性,不适于作为动态膜形成的基材;筛绢(140 目)清水膜通量稍大于筛绢(260 目)的清水膜通量,且由于运行过程中水头增加较慢,且运行中形成的动态膜较稳定,无脱落现象发生,是合适的基材;不锈钢表面光滑,不利于动态膜的形成,在运行过程中,形成的动态膜有时会局部脱落,不适于作为动态膜附着的基材。吴志超^[21]采用 150 目的不锈钢丝网作为膜基材,形成动态膜来处理城市生活污水。结果表明:动态膜在膜基材表面很快形成,稳定运行期间,出水平均浊度 1.2 NTU, COD 平均去除率 90%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率 97%。研究发现:出水水头越大,泥饼形成的速度越快,浊度衰减越快;而曝气强度越大,出水浊度越大,过大的曝气强度会影响动态膜泥饼的形成。同时发现:在 20、40 mm 的出水水头下,动态膜初期的膜通量衰减规律均符合泥饼阻力模型。

从以上学者的研究结果来看,去除效果会因为实验器材、控制条件不同而有较大差异。为了稳定自生态膜生物反应器 SFDMBR 对污水中污染物的去除

效果,还需要对自生动态膜生物反应器 SFDMBR 进行进一步研究。

3 自生动态膜生物反应器的影响因素

3.1 膜基材材质

不锈钢丝网、无纺布、工业滤布、尼龙筛网等是用来制作 DMBR 组件的常见基材,最近几年学者研究动态膜的材料,主要有不锈钢丝网、无纺布、尼龙筛网。无纺布的过滤性能要优于其它材料,不锈钢和尼龙筛网具有牢固、坚韧、易清洗等优点。基材选择时主要从化学稳定性、强度、使用寿命、耐污染性能、膜造价、热稳定性、产水性能等方面进行考虑。

膜会随着膜孔径的变化对应不同类型的物质进行过滤,过滤阻力会受到通量和水质的影响^[10]。Kiso Y 等^[15]把不同孔径(100 μm 、200 μm 、500 μm)的尼龙网作为基材进行对比实验,结果发现在 10 分钟后 100 μm 的滤网就使 SS 降到 10 mg/L,直到 40 分钟后降为 5 mg/L;虽然 200 μm 和 500 μm 孔径的滤网也可以在网膜表面形成动态膜,但从实验开始到动态膜形成期间 SS 一直很高,甚至在动态膜形成 1 h 后 SS 依然大于 80 mg/L。因而孔径为 100 的网膜比较适合用作动态膜的反应器且能有效除去 SS。在国内来说同济大学的高松等^[22]利用不同规格(孔径为 100 目、200 目、500 目)的不锈钢丝进行实验并对比结果,结果是孔径不同并没有对水通量造成很大的影响,而目数越大,水质质量越高。因此,基材的孔径对通量不具有决定性作用,只是受表面动态膜的影响最大;但是初始出水的 SS 会受到孔径很大的影响,该结论与其他学者的不一样。理论上膜组件表面的污泥层会对动态膜的处理效果起着决定性的作用。网膜只是一个载体用于支撑的目的,不会影响过滤的效果。但根据上述研究结果显示,动态膜的形成和结构会受到网膜孔径的大小和材质的影响,并且最终的处理效果也不能忽视。此外,当孔径超过一定范围时(>200 μm)动态膜是没有除去 SS 效果的,而当孔径在某个范围内(<100 μm)对排出的水质没有影响,并且膜的价格会随着孔径的减小而上升,但强度会降低,因此选用孔径在 80 ~ 100 μm 的膜是适宜的^[23]。

3.2 活性污泥性状

动态膜生物反应器受污泥浓度的影响很复杂,浓度越高,曝气强度就越强,但是强的曝气会破坏絮体,增加微小颗粒量使膜污染更严重。如果污泥的浓度过大也会影响处理液的黏度。在运行中,MLSS越高,处理效率越高,抗冲击力越强,缺点是会使膜的使用周期缩短和加速膜污染等问题,因此在实际运行中也要选择最优的MLSS^[9]。污泥龄也会对活性污泥产生的絮体性状产生巨大的影响,污泥龄越高絮体的粒径越小,而且粒度也越来越均匀;此外泥龄不同,污泥的絮体结构也不同,泥龄越短,絮体越粗糙,结构越疏松;反之,结构越密集且表面越平滑;并且泥龄越大,絮体的分形维数越多^[24]。

吴春英等^[25]使用微网基材构成的动态膜生物反应器来处理生活污水,结果显示污泥龄越高过滤压力差上升速率越慢(40天污泥龄比20天的慢)。他们还发现如果污泥解体就会造成系统不稳定,因为小颗粒会堵塞污泥层。动态膜反应器内的活性污泥一方面是污染物降解的主要场所和条件,另一方面也和动态膜的形成与分离性能密切相关。在动态膜分离过程中主要是附着的污泥层起分离作用,但动态膜污染的原因也是由于活性污泥的存在。如果可以找到一个合适的工艺条件,既不影响动态膜的形成,又可以在动态膜需要清洗的时候使污染层快速脱离膜基材,即可实现动态膜反应器长期稳定的运行。

3.3 曝气强度与错流流速

在DMBR系统中,曝气系统具有保持一定溶解氧浓度和均质的作用,另外也有人认为曝气可以有效控制膜污染,甚至可作为一种在线清洗膜污染的手段。KisoY等^[15]得到的结论是曝气强度越大,出水浊度越高,曝气量过大还会对动态膜的形成产生不良影响;并且在膜组件中利用间隔出水和曝气的方式能够减少膜污染和进行及时清洗。此外,当错流速度在3~10 cm/s范围内出水通量比较稳定,进行在线清洗一般使用较高的速度(20~40 cm/s)进行,在曝气1分钟后进行冲洗,再出水时就形成了新的动态膜。出水的通量和浊度立刻趋于稳定。曝气强度越大,错流流速越大,而错流形成的剪切力和膜两边的压力差会决定颗粒是否能积累在膜表面上。通过分析认为会存在一个使颗粒不沉积的最佳值,

这时动态膜处于一种平衡状态,而且出水通量和浊度也达到平衡。但是实际情况却是动态膜的形成和结构会受到错流流速的影响,流速越大,形成的膜越薄,但是变得更紧密,最终使得出水通量变小。现在亟待解决的问题就是要找到一种理想的模式,使动态膜系统运行时间延长。

3.4 出水水头

DMBR的一个优点是能够根据水头差(WHD, water head drop)自动出水,而且也证实动态膜的形成和运行系统的稳定性受到WHD及初始通量的影响,各国的学者已经着手探究最优的WHD和最佳的运行方式。

KisoY等^[15]也是利用实验发现WHD会随着出水通量的增加而增加,但是增加时并不是按照一定的比例进行的,WHD和出水通量的增加存在一定的滞后性。出水通量的变化是受膜表面污泥的增加导致的,而WHD的变化是因为污泥层的压缩引起的。同济大学的高松等^[22]对WHD的四种形式进行了探究,实验结果是在实验起始时水通量越大,WHD越大,但是通量快速减少,通量增加的大减速也快,实验证实,在2-30分钟水通量就能快速减小至一个稳定的值,如果超过30分钟通量基本上就变化不大。因此,WHD会随着出水动力的增加而增加,而且形成的动态膜也很厚,阻力也变大,最终主要是看两者谁能成为主要因素就能对通量产生影响。清华大学范彬等^[26]对动态膜的恢复期进行了研究(取WHD为0.5 cm、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm)。得出的实验结论是在动态膜运行时WHD主要起到压缩滤饼和提供动力的作用,目的是为了增加滤饼的比阻。

综合以上各国的研究结论得出,WHD主要是用来改变膜结构和提供动力的,WHD越高,出水动力越高,能够有效增加出水通量;另外,提高WHD具有压缩动态膜的效果,使出水阻力提升,这样就减弱了出水通量。因此想要延长动态膜正常运行时间就要找出最佳的出水通量,这还需要做很多研究才能实现。

4 研究展望

自生态膜生物反应器继承了传统膜生物反应器的优点,同时其本身还具有膜通量大,膜污染容易清洗,能耗低和价格低廉等优点。但其本身也存在一

些缺点；稳定性差，容易被外界环境破坏，造成出水水质差；只有特性良好且浓度适宜的污泥才能确保系统稳定运行；稳定运行时间短，膜清洗周期短；对氨氮 TN 和 TP 的去除效果较差。

自生态膜生物反应器工艺还不成熟，今后应在自生态膜污染的机理和自生态膜生物反应器工艺参数进行研究。

参考文献

- [1] 李旋, 尤朝阳, 黄刚华等. 自生态膜生物反应器的研究进展 [J]. 工业水处理, 2014, 34 (2): 11-14.
- [2] 尹娟. 动态膜生物反应器工艺 (DMBR) 的脱氮效能及数学模拟 [D]. 厦门: 华侨大学, 2011.
- [3] 张玉洁, 李小利, 赵继红. 动态膜生物反应器 (DMBR) 研究进展 [J]. 膜科学与技术, 2012, 32 (3): 117-122.
- [4] 孔令为, 贺锋, 夏世斌等. DMBR-IVCW 耦合工艺处理生活污水的研究 [J]. 水处理技术, 2013, 39 (8): 57-62.
- [5] Xuesong Yi, Wenxin Shi. Membrane science and technology: leader in water treatment industry [J]. Rev Environ Sci Biotechnol, 2012, 11: 227-229.
- [6] 余珂, 董滨, 周增炎等. 动态膜生物反应器的工艺研究现状及发展方向 [J]. 净水技术, 2006, 25 (2): 14-18.
- [7] 彭茜. 自生态膜生物反应器中膜形成与污染机理及调控策略 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [8] 罗鸿兵, 刘晓玲, 罗麟, 等. 我国动态膜技术在水处理中的研究进展 [J]. 水处理技术, 2008, 34 (5): 1-6.
- [9] 杨昌柱, 刘宏波, 濮文虹, 等. 自生态膜生物反应器处理城市污水 [J]. 中国给水排水, 2006, 22 (1): 105-108.
- [10] 乔森, 张捍民, 张兴文, 等. 动态膜技术的研究进展 [J]. 中国给水排水 2003, 19 (12): 29-31.
- [11] Bae T H, Tak T M. Effect of TiO_2 nanoparticles on fouling mitigation of Ultrafiltration membranes for activated sludge filtration [J]. Journal of

- Membrane Science, 2005, 249 (1-2) : 1-8.
- [12] Rezvani F, Mehmia M R, Poostchi A A. Optimal operating strategies of SFDM Formation for MBR application [J] . Separation and Purification Technology, 2014, 124 (1) : 124-133.
- [13] Liu H, Yang C, Pu W, et al. Formation mechanism and structure of dynamic Membrane in the dynamic membrane bioreactor [J] . Chemical Engineering Journal, 2009, 148 (2-3) : 290-295.
- [14] A. E. Marcinkowsky, K. A. Kraus, H. O. Phillips, et al. Hyperfiltration studies. IV. Salt rejection by dynamically formed hydrous oxide membranes [J] . Journal of American Chemical Society, 1966, 88: 5744-5750.
- [15] Kiso Y, Jung Y J, Ichinari T, et al. Wasterwater treatment performance of a filtration bio-reactor equipped with a mesh as a filter material [J] . Water. Research 2000, 34. (17) : 4143-4150.
- [16] G. T. Seo, B. H. Moom, T. S. Lee, et al. Non-woven fabric filter separation activated sludgy reactor for domestic wasterwater reclamation [J] . Water Science and Technology, 2002, 47 (1) : 133-138.
- [17] Chang W. K, Hu A. Y, Horng R. Y, et al. Membrane bioreactor with nonwoven fabrics as solid-liquid separation media for wasterwater treatment [J] . Desalination, 2007, 202 (1-3) : 122-128
- [18] 范彬, 黄霞, 文湘华. 动态膜—生物反应器对城市污水的处理 [J] . 环境科学, 2002, 23 (6) : 51-56.
- [19] 孟志国. 非织造布膜生物反应器处理生活污水研究 [D] . 大连: 大连理工大学, 2006.
- [20] 许春华. 强化混凝—动态膜工艺处理城市受污染河水的研究 [D] . 济南: 山东大学, 2009.
- [21] 吴志超, 田陆梅, 王旭等. 动态膜—生物反应器处理城市污水的运行特性研究 [J] . 环境污染与治理, 2008, 30 (5) : 47-50.
- [22] 高松. 动态膜生物反应器工艺研究 [D] . 上海: 同济大学, 2005.
- [23] 尤朝阳, 张丹, 肖晓强, 等. 膜基材对动态膜反应器处理效果的研究

- [J]. 水处理技术, 2013, 39 (1): 37-41.
- [24] 朱哲, 李涛, 王东升, 等. 不同泥龄下活性污泥絮体性状的研究 [J]. 环境化学, 2009, 28 (1): 10-15.
- [25] 吴春英, 吴盈禧, 夏俊林, 等. 动态膜生物反应器的运行稳定性及其影响因素研究 [J]. 中国给水排水, 2009, 25 (21): 21-25.
- [26] 范彬, 黄霞, 文湘华. 动态膜—生物反应器对城市污水的处理 [J]. 环境科学, 2002, 23 (6): 51-56.
- [27] Fan B, Huang X. Characteristics of a Self-Forming Dynamic Membrane Coupled With a Bioreactor for Municipal Wastewater Treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36 (23): 52-55.
- [28] Zhang X, Wang Z, Wu Z, et al. Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 165 (1): 175-183.

Status in Self-forming Dynamic Membrane Bioreactor Research

Ran Quan Kang Beibei Liu Zhenxian Fu Lu Tian Hui

Guizhou Industry Polytechnic College, Guiyang

Abstract: Self-forming dynamic membrane bioreactor is a potential wastewater treatment technology. In this paper, the structure and research status of the self-forming dynamic membrane bioreactor are introduced, and the factors affecting in the operation of the self-forming dynamic membrane bioreactor are analyzed. The aim is to provide useful reference for the research and extension of the self-forming dynamic membrane bioreactor.

Key words: Self-forming dynamic membrane bioreactor; Status; Factors