

膜生物反应器用于沼液处理及膜污染控制研究进展

隋倩雯, 董红敏, 朱志平, 黄宏坤

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 农业部畜牧环境设施设备监督检验测试中心, 北京 100081)

摘要: 我国沼气工程沼液产生量巨大, 还田利用无法广泛实施, 需采用水处理技术, 将其无害化处理, 而膜生物反应器作为一种新型的水处理技术, 具有出水水质好、结构紧凑等诸多特点。文章通过对大量的文献资料和研究结果进行分析, 介绍了膜生物反应器用于沼液处理的现状与优势, 阐述了应用膜生物反应器处理沼液的可行性, 并针对膜污染—膜生物反应器应用中的最大限制因素, 着重叙述了膜污染控制的五项措施。并建议在实际运行中, 调控膜污染因素, 使膜生物反应器长期、可持续运行。

关键词: 沼液; 处理; 膜生物反应器; 膜污染

中图分类号: X703; S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1166(2011)02-0007-06

Fouling Control of Membrane Bioreactor for Biogas Effluent Treatment / SUI Qian-wen, DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, HUANG Hong-kun / (Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences; Animal Environmental Facility Surveillance, Inspection and Testing Center, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: The amount of biogas effluent in China is large and hard to apply it to farmland widely, needing to be treated to make it environmental soundness. The process of membrane bioreactor(MBR) is a new kind of wastewater treatment technique. It has the traits of good effluent quality, and compact structure, etc. Through the analysis of study results from literatures, and based on the status and advantages of MBR, the feasibility of MBR treating biogas effluent is discussed in this paper. As for membrane fouling, the biggest restricting factor for MBR utilization, 5 measures for membrane fouling control are elaborated. Regulating and controlling the membrane fouling factors could make MBR operate in long-term and sustainably.

Key words: biogas effluent; treatment; membrane bioreactor(MBR); membrane fouling

我国每年农业废弃物(如畜禽粪便、秸秆等)产生量巨大, 未经处理随意排放对农村环境造成了严重的污染, 加之, 随着沼气工程的建设与应用, 每年将产生大量的厌氧消化产物(包括沼渣和沼液)。沼液由于其体积大, 不便运输、储存, 而又含有高浓度的有机物、氨氮等污染物, 如得不到妥善处理, 将造成农田、地下水的严重污染, 需利用水处理措施, 将其无害化处理。

膜生物反应器(MBR)作为一种新型的水处理技术, 国内外已在多种水处理领域进行了研究与应用, 运行结果表明其具有出水水质好、结构紧凑等特点。而应用膜生物反应器处理沼液, 膜组件不仅可以澄清出水, 还具有浓缩原液的功能。近年来随着膜生产技术的成熟与价格的降低, 膜污染成为膜生

物反应器应用中的最大限制因素。如何控制膜污染, 使其长时间、可持续运行, 防止频繁的膜化学清洗与更换, 是膜生物反应器研究的一个重要方向。

本文介绍了膜生物反应器的各项特点和应用于沼液处理的研究现状, 并针对沼液处理分别阐述了膜污染控制的五项措施, 为沼液处理提供解决思路, 并为缓解膜污染提供可行途径。

1 膜生物反应器的特点及其应用于沼液处理的研究现状

1.1 膜生物反应器的特点

随着近年来更为严格的水质标准的制定与执行, 膜组件生产技术的成熟和价格的降低, 膜生物反应器运行机理、以及膜污染控制等研究领域的不断

收稿日期: 2010-10-29

项目来源: 国家生猪现代化产业技术体系建设(nycytx-09); 公益性行业(农业)科研专项(200803036); “十一五”国家科技支撑子课题(2008BAD4B17-03)

作者简介: 隋倩雯(1986-), 硕士研究生, 主要研究方向为农业生物环境, E-mail: suiqianwen@163.com

通讯作者: 董红敏, E-mail: donghm@idea.org.cn

探索,膜生物反应器在水处理方面得到了广泛的应用与研究。通常认为,膜生物反应器具有五大特点:1)微生物浓度高;2)处理水质好;3)污泥产量少;4)构型紧凑、占地面积小;5)抗冲击负荷能力强。

不仅如此,膜生物反应器用于沼液处理,具有其自身独有的优势,即不管是错流过滤^[1]还是死端过滤^[2],通过膜的截留作用,都可以在膜一侧形成浓缩液,而另一侧形成透过液,因此具有浓缩原液,并澄清出水的作用。沼液中含有丰富的营养物质,而且产生量大。通过浓缩处理使沼液减量化,方便运输,浓缩后的沼液用于施肥,可以实现资源循环利用的目的。国外的沼液浓缩经验^[3]也证实了膜生物反应器用于沼液处理的可行性。

此外,膜生物反应器不仅可用于有机物的去除,还可包含其他污染处理反应,如硝化反应;或将MBR与传统污水处理工艺(如UASB)结合,在浓度高、难降解污水领域,扩大了应用范围。

例如,猪场污水含有大量的难生物降解物质,难以直接通过活性污泥法得到有效地处理,而高浓度游离态氨使污水pH过高,对硝化反应产生抑制作用,因此,较难通过好氧反应有效地去除有机物和氨。Jeong-Hoon Shin^[4]等在膜生物反应器(MBR)之前设置升流式厌氧滤床(Anaerobic upflow bed filter, AUBF)反应器。AUBF反应器的作用是酸化和反硝化,而MBR反应器用于硝化和有机物去除,在两个反应器之间形成300%的回流,可以使COD去除率达到90%以上,氨氮去除率98%。值得注意的是,AUBF反应器采纳了厌氧产甲烷发酵反应的第一阶段,将大颗粒有机物水解酸化成小颗粒有机物,由于碳源的限制,该反应不产甲烷。Yingyu An^[5]等也进行了类似的尝试,采用短程硝化反硝化反应将UASB与MBR结合起来。MBR中发生短程硝化反应产生亚硝酸盐,后通过回流至UASB反应器,再进行反硝化反应。由于亚硝酸盐的反硝化反应比硝酸盐需要消耗更少的有机物,UASB可以兼顾产甲烷和反硝化反应。不过短程硝化反硝化反应对环境控制要求非常严格,作者指出:低C/N比是MBR反应器中亚硝酸盐积累的关键因素。

此外,膜对微生物具有很好的截留效果。如:微滤膜(孔径为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ m)可以截留全部细菌,而超滤膜(孔径为 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ m)可以截留大部分的病毒,因此,膜技术是一种优良的物理消毒方法^[6]。在很多研究与实际工程应用中,膜工艺出水符合中

水回用标准,可以用于粪便冲洗、绿化灌溉^[7]、工业冷却^[8]等多种用途,这既节省了大量自来水,也创造了一定的经济价值。因此,沼液经膜生物反应器处理后,去除了其中的有机物、氨氮等污染物和大肠杆菌等病原微生物,透过液可以作为畜禽养殖场的冲栏用水或农田灌溉用水,具有重要的循环利用与可持续发展潜力。

1.2 膜生物反应器用于沼液处理的研究现状

国内外应用膜生物反应器处理沼液的研究并不广泛,在为数不多的相关研究中,有采用管式膜组件的,也有采用一体式膜生物反应器的;有以澄清出水为主要目标的,也有以回收利用有机营养物为研究方向的。

孟海玲^[9]采用一体式膜生物反应器处理猪场污水厌氧消化液,间歇曝气池与膜池相连,用于有机物与氨氮的去除。他们通过调节不同的水力停留时间、曝停比、污泥停留时间和抽停比以获得最佳的有机物和氨氮去除率。作者指出^[10],膜生物反应器可以有效地截留微生物,提高反应器中污泥浓度,使有机负荷与氨氮负荷分别达到 $1.32 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.6 \text{ kgNH}_4^+ \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,均高于传统活性污泥法。与此不同,F Waeger^[11]采用管式膜组件处理厌氧消化液,通过调节不同运行参数,如跨膜压差、错流速率和膜孔径,以获得最大运行通量。试验证明,相同条件下超滤膜比微滤膜运行通量高30%,这是由于微滤膜更易发生膜孔堵塞。膜生物反应器除了可以获得高质量出水以外,还可以用于浓缩原液。荷兰就在此方面进行了相关研究,研究者^[3]通过超滤与反渗透相结合工艺处理沼液,浓缩回收沼液中的营养物质,浓缩液中N、P、K分别达到6.8、0.5、11.6 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$,浓缩液用于施肥,而透过液排放至污水管网。

虽然膜生物反应器在水处理方面具有多种突出的优势,将其用于沼液处理在国内外也进行了初步尝试,但如何控制膜污染,使膜能长时间、可持续运行,防止频繁的膜化学清洗与更换,是膜生物反应器研究的一个重要方向。

2 膜污染控制措施

膜污染指的是膜生物反应器中被截留物容易沉积在膜表面,产生各种不良现象,导致在既定跨膜压差(transmembrane pressure, TMP)下透过膜的流量(即膜通量)减小,或在既定膜通量下跨膜压差增

大,即透水率(膜通量与跨膜压差之比)降低^[12]。膜污染往往是膜生物反应器应用中的最大限制因素,目前,膜污染机制与控制膜污染方法是膜生物反应器研究领域的一个重要方向。在实践应用中,控制膜污染的方法通常包括以下5个方面:1)对进水适当的预处理;2)采用适当的物理或化学清洗方案;3)降低通量;4)增加曝气量;5)采用化学或生化方法调控混合液^[12]。

2.1 进水预处理

对进水进行适当的预处理通常包括设置格栅、初沉池等处理设施,去除污水中的大颗粒、难降解物质。对于厌氧消化物(包括沼渣和沼液)来说,固形物含量较高,需要进行固液分离,现阶段普遍采用的固液分离方式包括:螺旋挤压、沉淀、离心分离等措施,或者几种方法结合使用^[11]。

2.2 降低通量

降低膜通量可以减轻膜污染,通常来说,当运行通量过大时,跨膜压差会持续增加,膜污染迅速。通过多年来运行经验的总结,人们普遍认为低通量的持续运行比高通量短期运行更有利,这可以避免频繁的清洗与膜更换。在实际运行中,膜生物反应器往往采用恒通量出水,通过测试跨膜压差(TMP)的变化,判断膜的污染情况^[13]。Field^[14]等首次提出临界通量的概念,他指出:在启动阶段存在一个通量值,低于该值时,运行通量不会随时间下降,高于该值时,就会造成膜污染。Howell^[15]提出了次临界通量的概念,即低于临界通量运行,膜污染不明显,他还指出临界通量与污泥粒径、水力学性质,和胶体与膜之间相互作用有关。然而从大量试验与实际工程运行中发现,虽然运行通量低于临界通量,膜生物反应器可以维持较长时间的正常运行,但TMP也会出现二阶段的上升过程^[16]。第一阶段为近似线性的慢速上升过程。污泥颗粒向膜面移动的拉力与反向作用力(如布朗扩散作用、曝气剪切作用)相等,悬浮固体的膜面沉积作用不明显。这一阶段的TMP是由微生物胞外聚合物(Extracellular polymeric substances, EPS)在膜表面不可逆附着,并堵塞膜孔造成的。近年来,有学者指出上清液中溶解性多糖类EPS对TMP的慢速上升过程至关重要^[17-18]。而第二阶段出现TMP的指数增长阶段,致使MBR无法正常运行。这是因为经过第一阶段,有效膜面积大量缩减,使膜局部通量高于临界通量,悬浮固体失去平衡,向膜面移动,不断的附着、沉积,

形成致密的滤饼层,使TMP快速升高。通过膜阻分布分析可知滤饼阻力占绝大部分,膜孔堵塞占较小部分^[11,19]。当第二阶段出现时,就必须对膜进行物理或化学清洗。许多膜生物反应器在恒通量运行时都规定了最大TMP,当压力升至该值时,就要进行化学清洗。基于在临界通量之下TMP的二阶段升高过程,Cho和Fane^[16]提出了可持续通量的概念,即在可持续通量以下操作时,没有发生污泥颗粒在膜表面大规模聚集,膜污染主要是溶解性代谢产物(EPS)造成的TMP上升。即可持续通量是EPS污染与滤饼污染的临界点。为防止膜污染,保证MBR可持续的运行,应选择适合的运行通量,降低反应器中EPS(如加入絮凝剂)^[20],延长TMP的慢速升高过程;并防止悬浮固体的沉积,破坏滤饼层的形成(如增加曝气量、反冲洗),防止TMP快速增长过程的过早发生。

目前,测定临界通量主要采用通量阶梯试验(flux stepping test)^[21-23]。它是利用干净的膜,按一定的阶梯长度(step length, SL)恒通量运行,并以一定的阶梯高度(step height, SH)提高通量,测试相应的TMP变化,当TMP不再稳定时,则可以结束通量阶梯试验,TMP稳定的最后一次试验所采用的通量值即为临界通量。Pierre Le Clech^[21]提出应利用压差变化率(dP/dt)的变化来表征膜的临界通量,并建议以尽可能小的阶梯高度和适宜的阶梯长度(15~30 min)进行通量试验,此外,在相同运行条件下,长周期试验比通量阶梯试验测得的压差变化率(dP/dt)低,这说明无法通过通量阶梯试验完全模拟不同通量下膜污染情况^[24],不过在允许一定误差的前提下,还是可以采用该方法来预测临界通量。

2.3 增加曝气量

曝气对于膜生物反应器来说是能源消耗最大的一项运行措施。曝气不仅具有给微生物提供氧气的作用,还具有冲刷膜表面维持膜通量的作用。对于浸没式膜组件(SMBR)来说,曝气的冲刷作用尤为突出,通过曝气可以在膜表面产生错流环境,缓解浓差极化,防止颗粒在膜表面的沉积。

H C Chua^[25]等提出通过改变膜生物反应器的通量和曝气量便可有效的控制膜污染,这样在长时间的运行过程中可以免去化学清洗过程。通过试验证明,过大的通量和过小的膜表面气体流速都会造成膜污染。Rui Liu^[26]等通过试验也得到相似的结论,即错流速率与曝气强度呈正相关,与悬浮固体浓

度呈负相关。但该试验只考虑了滤饼污染,还有15%的膜污染来自于凝胶层和膜孔堵塞,其结果具有一定的局限性。此外,该试验还确定了临界通量和临界曝气强度,即当运行通量大于临界通量,或曝气量小于临界曝气量时,膜污染速度较快,无法维持膜的可持续运行。

尽管在浸没式膜生物反应器中,通过曝气可以产生气、液二相流^[27],冲刷膜表面形成剪切力^[28],并使膜振动,防止颗粒物沉积,并防止膜与溶液界面上发生浓差极化^[27]。但是近年来,随着对微观领域的不断探索,有很多研究者发现,过大的曝气量会造成悬浮固体破碎,污泥粒径变小,释放出更多胶体和溶解物,使膜污染加剧^[19]。这主要是由于胶体和可溶物被认为是造成膜孔堵塞的关键原因^[29],膜孔堵塞是一种不可逆的膜污染类型,而较小的污泥颗粒会形成更为致密的滤饼层,膜阻较大,较难去除^[19]。

Tung - Wen Cheng^[29]等利用葡萄聚糖和有机玻璃粉末合成试验原液,发现葡萄聚糖比有机玻璃粉末可以形成更高的膜阻,这主要是由于葡萄聚糖这种溶解性物质可以沉积在膜表面和内部,造成膜污染。此外,还通过试验证明将膜倾斜160°比垂直(90°)置于曝气设备上方,在维持相同的通量情况下,需要较低的曝气量,这更节约运行成本。

通常曝气量的确定是通过经验取值或膜组件生产厂家的推荐取值,针对不同性质的液体,曝气量需要具体设计计算或试验确定。尤其对于沼液来说,成分复杂,有机物、氨氮、悬浮固体浓度高。在浸没式膜生物反应器中,其曝气量的确定不仅要考虑微生物生化反应的需氧量,还需要考虑气液二相流的剪切作用,冲刷膜表面,去除滤饼层。已进行的研究中,多倾向于考虑曝气量对膜污染的影响,对于曝气量对有机物的去除、氨氮的氧化及膜污染的综合影响还未进行全面的研究。此外,膜生物反应器用于沼液处理,多采用错流过滤工艺^[3,11],较少采用浸没式膜组件与生化反应池相结合工艺。针对沼液氨氮浓度高^[30],膜截留率低的特点^[9,11],需要在沼液过滤之前,利用微生物作用,通过好氧处理,将氨氮转化为硝态氮,增大膜的截留率,保证透过液的达标排放。因此,通过调整曝气量来促进氨氮的氧化和有机物降解,并缓解膜污染,具有重要意义。

2.4 调控混合液

近年来,众多研究发现在反应器中添加吸附剂或絮凝剂,可以有效地缓解膜污染。吸附剂(如活性炭、沸石)具有巨大的比表面积,可以吸附反应器

中有机物^[31],提高有机物的去除率^[32],促进污泥沉降^[33],并提高临界通量,减轻膜污染^[32]。絮凝剂(如高分子絮凝剂:聚合氯化铝、聚合硫酸铁、聚酰胺,无机盐絮凝剂:硫酸铝、氯化铁、明矾)由于可以提供大量的正电荷,可以去除上清液中的胶体,并增大污泥颗粒,因此对于减缓膜污染具有重要作用^[11,34]。Wu^[34]等指出絮凝剂对膜污染的控制作用主要由于限制凝胶层形成,减缓污染物的发展,并去除膜表面的污染物。

厌氧消化液中含有大量的小颗粒悬浮固体和溶解性固体,包括可溶性固体和胶体。这些物质易于堵塞膜孔,形成滤饼层,造成膜污染^[35]。对厌氧消化物在进入膜池之前进行调控,是非常必要的。Bing Wu^[20]等分别采用吸附剂和絮凝剂对厌氧消化液进行处理,结果发现吸附剂中活性炭比沸石具有更好的缓解膜污染的能力,但过量的使用会使其自身变成污染物。而絮凝剂比吸附剂作用明显,聚合氯化铝在投加量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时可以达到最好的控制膜污染效果。此外,作者还提出将曝气与絮凝剂结合使用,可以更有效的去除膜表面污染物。F Waeger^[11]也进行了类似的试验,在厌氧消化液中分别加入不同剂量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 FeCl_3 ,结果表明0.5%的 FeCl_3 使通量提高了47%,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的加入对通量没有提高,甚至略有降低。

除采用物理化学方法在反应器中投加化学药剂缓解膜污染以外,还可以在MBR中加入生物填料,使悬浮生长的微生物,附着于填料上。TorOve Leiknes通过试验证明,生物膜法MBR(Biofilm membrane bioreactor, BF-MBR)有机负荷率可维持在 $2 \sim 8 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$,而传统活性污泥法MBR的有机负荷率只有 $1 \sim 3 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ ^[36]。P Artiga在处理高浓度制革污水的时候也采用类似的反应器,有机负荷达到 $4.5 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$,去除率为95%,而氨氮负荷达到 $1.2 \text{ kgNH}_4^+ \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$,去除率为97%,有机物和氨氮同时达到了较好的处理效果。作者指出这可能是由于该试验采用了较小的颗粒填料(1~3 mm),填料上只能附着少量的微生物,曝气产生的剪切作用防止异养微生物在填料上附着生长,而促进了硝化菌的附着生长,因此硝化反应完全^[37]。

杨期勇^[38-40]采用MBR与加入填料的MBR(hybrid membrane bioreactor, HMBR)进行平行对比试验。试验结果发现,MBR的COD去除率略高于HMBR,这归因于HMBR中填料对膜上附着的污泥

层的去除作用,使某些溶解性有机物滤过膜进入出水中。而 HMBR 临界通量比 MBR 高 20%,连续运行 30 d, HMBR 的膜污染速率只占 MBR 的 30%,可以看出加入生物填料可以减轻膜污染,并延长稳定运行时间。但随着试验的长期运行, HMBR 中悬浮固体平均粒径比 MBR 降低迅速,粒径分布更窄,上清液中 EPS 也略有增加。因此,添加填料的 MBR 中形成的气、液、固三相流对悬浮污泥产生的剪切作用, EPS 释放,污泥粒径减小等都对膜污染产生影响,其对微生物相的影响还需要进一步研究。此外,在膜生物反应器中添加生物填料处理沼液对膜污染的缓解作用以及对有机物去除、氨氮硝化的影响,国内外尚未进行过相关研究。

2.5 物理或化学清洗

膜清洗分为物理清洗和化学清洗。物理清洗主要包括反冲洗和膜松弛。反冲洗还包括空气反冲洗和液体反冲洗。而膜松弛指的是反应器停止抽吸出水,并持续曝气冲刷膜表面,这有助于滤饼层脱离膜表面^[41]。而化学清洗则是采用化学药剂如次氯酸、次氯酸钠、柠檬酸等对膜进行原位清洗或非原位清洗。通常说来,物理清洗时间较短,主要针对膜表面附着的可逆性污染,而化学清洗需要较长时间,可以去除膜孔堵塞、凝胶层等不可逆性污染。近年来,有学者提出利用超声波对膜进行清洗,超声波去除的主要为滤饼污染。将超声波处理与反冲洗和化学清洗结合使用,透水率几乎可以得到完全恢复^[42]。

3 结 语

随着沼气工程在我国不断发展,沼液产生量大,若得不到妥善处理,将造成环境污染。沼液处理已成为一项亟待解决的环境问题。膜生物反应器具有澄清出水,并浓缩原液的作用,应用膜生物反应器处理沼液既可做到资源回收利用,又可以防止环境污染,是一种具有巨大发展潜力的沼液处理方法。但该处理方法在国际与国内的研究尚处于初步阶段,还存在很多限制因素,需要进一步研究与解决。

参考文献:

- [1] W Scholz, M Lucas. Techno-economic evaluation of membrane filtration for recovery and re-use of tanning chemicals[J]. Water Research, 2003, 37: 1859-1867.
- [2] Igor Ivanovic, TorOve Leiknes. Impact of aeration rates on particle colloidal fraction in the biofilm membrane bioreactor (BF-MBR)[J]. Desalination, 2008, 231: 182-190.
- [3] Solomie A. Gebrezgabher, Miranda P. M. Meuwissen, Bram A. M. Prins, et al. Economic analysis of anaerobic digestion—A case of Green power biogas plant in The Netherlands[J]. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 2010, 57(2): 109-115.
- [4] Jeong-Hoon Shin, Sang-Min Lee, Jin-Young Jung, et al. Enhanced COD and nitrogen removals for the treatment of swine wastewater by combining submerged membrane bioreactor and anaerobic upflow bed filter reactor[J]. Process biochemistry, 2005, 40: 3769-3776.
- [5] Yingyu An, Fenglin Yang, Hwee Chuan Chua, et al. The integration of methanogenesis with shortcut nitrification and nitrification in a combined UASB with MBR[J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 3714-3720.
- [6] T Melin, B Jefferson, D Bixio, et al. Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse[J]. Desalination, 2006, 187: 271-282.
- [7] 戈军, 荆肇乾, 吕锡武. 膜生物反应器中水回用示范工程[J]. 水处理技术, 2007, 33(4): 75-77.
- [8] Lain Chuen Juang, Dyi Hwa Tseng, He-Yin Lin. Membrane processes for water reuse from the effluent of industrial park wastewater treatment plant: a study on flux and fouling of membrane[J]. Desalination, 2007, 202: 302-309.
- [9] 孟海玲, 董红敏, 朱志平, 韩磊. 运行条件对膜生物反应器处理猪场厌氧消化液效果的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 179-183.
- [10] 孟海玲, 董红敏, 黄宏坤. 膜生物反应器用于猪场污水深度处理试验[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1277-1281.
- [11] F Waeger, T Delhaye, W Fuchs. The use of ceramic microfiltration and ultrafiltration membranes for particle removal from anaerobic digester effluents[J]. Separation and Purification Technology, 2010, 73(2): 271-278.
- [12] Simon Judd, Claire Judd. 膜生物反应器水和污水处理的原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [13] A G Fane. Membrane bioreactors: design and operation options[J]. Filtration & Separation, 2002, 29: 26-29.
- [14] R W Field, D Wu, J A Howell, et al. Critical flux concept for microfiltration fouling[J]. Journal of Membrane Science, 1995, 100: 259-272.
- [15] John A Howell. Sub-critical flux operation of microfiltration[J]. Journal of Membrane Science, 1995, 107: 165-171.
- [16] B D Cho, A G Fane. Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor[J]. Journal of Membrane Science, 2002, 209: 391-403.
- [17] J Zhang, H C Chua, J Zhou, et al. Factors affecting the

- membrane performance in submerged membrane bioreactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 284: 54 – 66.
- [18] Fengshen Fan, Hongde Zhou, Hadi Husain. Identification of wastewater sludge characteristics to predict critical flux for membrane bioreactor processes [J]. *Water Research*, 2006, 40: 205 – 212.
- [19] Fangang Meng, Fenglin Yang, Baoqiang Shi. A comprehensive study on membrane fouling in submerged MBR operated under different aeration intensities [J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 59: 91 – 100.
- [20] Bing Wu, Yingyu An, Yao zhong Li, et al. Effect of adsorption/coagulation on membrane fouling in microfiltration process post – treating anaerobic digestion effluent [J]. *Desalination*, 2009, 242: 183 – 192.
- [21] Pierre Le Clech, Bruce Jefferson, In Soung Chang, et al. Critical flux determination by the flux – step method in a sub – merged membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2003, 227: 81 – 93.
- [22] S Chang, A G Fane, T D Waite. Analysis of constant permeate flow filtration using dead – end hollow fiber membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 268: 132 – 141.
- [23] Zhichao Wu, Zhiwei Wang, Shengsan Huang, et al. Effects of various factors on critical flux in submerged membrane bioreactors for municipal wastewater treatment [J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 62: 56 – 63.
- [24] Søren Prip Beier, Gunnar Jonsson. Critical flux determination by flux – stepping [J]. *AIChE Journal*, 2010, 56 (7): 1739 – 1747.
- [25] H C Chua, T C Arnot, J A Howell. Controlling fouling in membrane bioreactors operated with a variable throughput [J]. *Desalination*, 2002, 149: 225 – 229.
- [26] Rui Liu, Xia Huang, You Feng Sun, et al. Hydrodynamics effect on sludge accumulation over membrane surfaces in a submerged membrane bioreactor [J]. *Process Biochemistry*, 2003, 39: 157 – 163.
- [27] S R Bellara, Z F Cui, D S Pepper. Gas sparging to enhance permeate flux in ultrafiltration using hollow fiber membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 1996, 121: 175 – 184.
- [28] Tatsuki Ueda, Kenji Hata, Yasuto Kikuka, et al. Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 1997, 31 (3): 489 – 494.
- [29] Tung Wen Cheng, Zeh Wea Lee. Effects of aeration and inclination on flux performance of submerged membrane filtration [J]. *Desalination*, 2008, 234: 74 – 80.
- [30] Xiaohui Lei, Norio Sugiura, Chuanping Feng, et al. Pre-treatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification [J]. *Journal of Membrane Science*, 2007, 145: 391 – 397.
- [31] Yue Jia, Rong Wang, A G Fane. Effect of air bubbling on atrazine adsorption in water by powdered activated carbons – competitive adsorption of impurities [J]. *Separation and Purification Technology*, 2005, 46: 79 – 87.
- [32] Yamini Satyawali, Malini Balakrishnan. Performance enhancement with powered activated carbon (PAC) addition in a membrane bioreactor (MBR) treating distillery effluent [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170: 457 – 465.
- [33] Yamini Satyawali, Malini Balakrishnan. Effect of PAC addition on sludge properties in an MBR treating high strength wastewater [J]. *Water Research*, 2009, 43: 1577 – 1588.
- [34] Jinling Wu, Futai Chen, Xia Huang, et al. Using inorganic coagulants to control membrane fouling in a submerged membrane bioreactor [J]. *Desalination*, 2006, 197: 124 – 136.
- [35] S Rosenberger, H Evenblij, S te Poele. The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes – six case studies of different European research groups [J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, 263: 113 – 126.
- [36] TorOve Leiknes, Hallvard Ødegaard. The development of a biofilm membrane bioreactor [J]. *Desalination*, 2007, 202: 135 – 143.
- [37] P Artiga, V Oyanedel, J M Garrido, et al. An innovative biofilm – suspended biomass hybrid membrane bioreactor for wastewater treatment [J]. *Desalination*, 2005, 179: 171 – 179.
- [38] 杨期勇. 颗粒填料复合式膜生物反应器的长期运行特性 [J]. *环境工程学报*, 2008, 2 (1): 31 – 37.
- [39] Qiyong Yang, Jihua Chen, Feng Zhang. Membrane fouling control in a submerged membrane bioreactor with porous, flexible suspended carriers [J]. *Desalination*, 2006, 189: 292 – 302.
- [40] Qi Yong Yang, Tao Yang, Hui Juan Wang. Filtration characteristics of activated sludge in hybrid membrane with porous suspended carries (HMBR) [J]. *Desalination*, 2009, 249: 507 – 514.
- [41] S P Hong, T H Bae, T M Tak, et al. Fouling control in activated sludge submerged hollow fiber membrane bioreactor [J]. *Desalination*, 2002, 143: 219 – 228.
- [42] A L Lim, Renbi Bai. Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater [J]. *Journal of Membrane Science*, 2003, 216: 279 – 290.

作者: 隋倩雯, 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, SUI Qian-wen, DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, HUANG Hong-kun
作者单位: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部畜牧环境设施设备监督检验测试中心, 北京, 100081
刊名: 中国沼气 
英文刊名: CHINA BIOGAS
年, 卷(期): 2011, 29(2)
被引用次数: 1次

参考文献(42条)

1. W Scholz; M Lucas [Techno-economic evaluation of membrane filtration for recovery and re-use of tanning chemicals](#) 2003
2. Igor Ivanovic; TorOve Leiknes [Impact of aeration rates on particle colloidal fraction in the biofilm membrane bioreactor \(BF-MBR\)](#) [外文期刊] 2008(1/3)
3. Solomie A. Gebrezgabher; Miranda P. M. Meuwissen; Bram A. M. Prins [Economic analysis of anaerobic digestion-A case of Green power biogas plant in The Netherlands](#) [外文期刊] 2010(02)
4. Jeong-Hoon Shin; Sang-Min Lee; Jin-Young Jung [Enhanced COD and nitrogen removals for the treatment of swine wastewater by combining submerged membrane bioreactor and anaerobic upflow bed filter reactor](#) 2005
5. Yingyu An; Fenglin Yang; Hwee Chuan Chua [The integration of methanogenesis with shortcut nitrification and nitrification in a combined UASB with MBR](#) 2008
6. T Melin; B Jefferson; D Bixio [Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse](#) [外文期刊] 2006(1/3)
7. 戈军; 荆肇乾; 吕锡武 [膜生物反应器中水回用示范工程](#) [期刊论文]-[水处理技术](#) 2007(04)
8. Lain Chuen Juang; Dyi Hwa Tseng; He-Yin Lin [Membrane processes for water reuse from the effluent of industrial park wastewater treatment plant: a study on flux and fouling of membrane](#) 2007
9. 孟海玲; 董红敏; 朱志平; 韩磊 [运行条件对膜生物反应器处理猪场厌氧消化液效果的影响](#) [期刊论文]-[农业工程学报](#) 2008(09)
10. 孟海玲; 董红敏; 黄宏坤 [膜生物反应器用于猪场污水深度处理试验](#) [期刊论文]-[农业环境科学学报](#) 2007(04)
11. F Waeger; T Delhaye; W Fuchs [The use of ceramic microfiltration and ultrafiltration membranes for particle removal from anaerobic digester effluents](#) [外文期刊] 2010(02)
12. Simon Judd; Claire Judd [膜生物反应器水和污水处理的原理与应用](#) 2009
13. A G Fane [Membrane bioreactors: design and operation options](#) 2002
14. R W Field; D Wu; J A Howell [Critical flux concept for microfiltration fouling](#) 1995
15. John A Howell [Sub-critical flux operation of microfiltration](#) 1995
16. B D Cho; A G Fane [Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor](#) 2002
17. J Zhang; H C Chua; J Zhou [Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors](#) [外文期刊] 2006(1/2)
18. Fengshen Fan; Hongde Zhou; Hadi Husain [Identification of wastewater sludge characteristics to](#)

[predict critical flux for membrane bioreactor processes](#)[外文期刊] 2006(2)

19. [Fangang Meng;Fenglin Yang;Baoqiang Shi A comprehensive study on membrane fouling in submerged MBR operated under different aeration intensities](#) 2008
20. [Bing Wu;Yingyu An;Yao zhong Li Effect of adsorption/coagulation on membrane fouling in microfiltration process post-treating anaerobic digestion effluent](#)[外文期刊] 2009(1/3)
21. [Pierre Le Clech;Bruce Jefferson;In Soung Chang Critical flux determination by the flux-step method in a sub-merged membrane bioreactor](#) 2003
22. [S Chang;A G Fane;T D Waite Analysis of constant permeate flow filtration using dead-end hollow fiber membrane](#) 2006
23. [Zhichao Wu;Zhiwei Wang;Shengsan Huang Effects of various factors on critical flux in submerged membrane bioreactors for municipal wastewater treatment](#)[外文期刊] 2008(1)
24. [S Øren Prip Beier;Cunнар Jonsson Critical flux determination by flux-stepping](#)[外文期刊] 2010(07)
25. [H C Chua;T C Arnot;J A Howell Controlling fouling in membrane bioreactors operated with a variable throughput](#)[外文期刊] 2002(1/3)
26. [Rui Liu;Xia Huang;You Feng Sun Hydrodynamics effect on sludge accumulation over membrane surfaces in a submerged membrane bioreactor](#) 2003
27. [S R Bellara;Z F Cui;D S Pepper Gas sparging to enhance permeate flux in ultrafiltration using hollow fiber membrane](#) 1996
28. [Tatsuki Ueda;Kenji Hata;Yasuto Kikuka Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor](#) 1997(03)
29. [Tung Wen Cheng;Zeh Wea Lee Effects of aeration and inclination on flux performance of submerged membrane filtration](#) 2008
30. [Xiaohui Lei;Norio Sugiura;Chuanping Feng Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification](#)[外文期刊] 2007(3)
31. [Yue Jia;Rong Wang;A G Fane Effect of air bubbling on atrazine adsorption in water by powdered activated carbons-competitive adsorption of impurities](#)[外文期刊] 2005(1/2)
32. [Yamini Satyawali;Malini Balakrishnan Performance enhancement with powered activated carbon \(PAC\) addition in a membrane bioreactor \(MBR\) treating distillery effluent](#) 2009
33. [Yamini Satyawali;Malini Balakrishnan Effect of PAC addition on sludge properties in an MBR treating high strength wastewater](#)[外文期刊] 2009(6)
34. [Jinling Wu;Futai Chen;Xia Huang Using inorganic coagulants to control membrane fouling in a submerged membrane bioreactor](#)[外文期刊] 2006(1/3)
35. [S Rosenberger;H Evenblij;S te Poele The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes-six case studies of different European research groups](#) 2005
36. [TorOve Leiknes;Hallvard Ødegaard The development of a biofilm membrane bioreactor](#)[外文期刊] 2007(1/3)
37. [P Artiga;V Oyanedel;J M Garrido An innovative biofilm-suspended biomass hybrid membrane](#)

[bioreactor for wastewater treatment](#)[外文期刊] 2005(1/3)

38. [杨期勇](#) [颗粒填料复合式膜生物反应器的长期运行特性](#)[期刊论文]-[环境工程学报](#) 2008(01)

39. [Qiyong Yang](#);[Jihua Chen](#);[Feng Zhang](#) [Membrane fouling control in a submerged membrane bioreactor with porous, flexible suspended carriers](#)[外文期刊] 2006(1/3)

40. [Qi Yong Yang](#);[Tao Yang](#);[Hui Juan Wang](#) [Filtration characteristics of activated sludge in hybrid membrane with porous suspended carries \(HMBR\)](#) 2009

41. [S P Hong](#);[T H Bae](#);[T M Tak](#) [Fouling control in activated sludge submerged hollow fiber membrane bioreactor](#) 2002

42. [A L Lim](#);[Renbi Bai](#) [Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater](#) [外文期刊] 2003(1/2)

本文读者也读过(4条)

1. [高慧](#),[王敏](#),[GAO Hui](#),[WANG Min](#) [Fenton-混凝法处理生活垃圾沼液试验研究](#)[期刊论文]-[工业用水与废水](#) 2010, 41(5)

2. [隋倩雯](#),[董红敏](#),[朱志平](#),[黄宏坤](#),[SUI Qian-wen](#),[DONG Hong-min](#),[ZHU Zhi-ping](#),[HUANG Hong-kun](#) [沼液深度处理技术研究与应用现状](#)[期刊论文]-[中国农业科技导报](#)2011, 13(1)

3. [罗明](#),[田鑫](#),[杨可](#),[梁运祥](#) [生物强化生态系统处理养殖沼液的研究](#)[期刊论文]-[养猪](#)2011(1)

4. [米闯](#),[谢丽](#),[周琪](#),[杨殿海](#),[Shim H J](#),[Mi Chuang](#),[Xie Li](#),[Zhou Qi](#),[Yang Dianhai](#),[Shim H J](#) [膜生物反应器中污泥膨胀与生物泡沫的形成与控制研究进展](#)[期刊论文]-[水处理技术](#)2011, 37(6)

引证文献(2条)

1. [袁基刚](#),[刘兴勇](#),[王成端](#),[李敏](#) [改性粉煤灰对沼液中氨氮吸附动力学研究](#)[期刊论文]-[环境工程](#) 2013(6)

2. [牛立群](#),[李七平](#),[魏海东](#),[解明](#),[杨德生](#),[李维亮](#) [餐厨垃圾与农业秸秆的厌氧发酵区别](#)[期刊论文]-[能源与节能](#) 2014(10)

引用本文格式: [隋倩雯](#),[董红敏](#),[朱志平](#),[黄宏坤](#),[SUI Qian-wen](#),[DONG Hong-min](#),[ZHU Zhi-ping](#),[HUANG Hong-kun](#) [膜生物反应器用于沼液处理及膜污染控制研究进展](#)[期刊论文]-[中国沼气](#) 2011(2)