

# 超声 AnMBR 在污泥消化中的研究前景展望

孙峥<sup>1</sup>, 徐东耀<sup>1</sup>, 宋昭<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)化环学院, 北京 100083;

2. 百年建筑杂志出版社, 北京 100190)

**摘要:** 本文研究了城市剩余污泥厌氧消化处理现状, 总结了厌氧膜生物反应器 (AnMBR) 在处理污泥方面的研究进展。AnMBR 工艺发展的瓶颈是膜污染, 而近年来研究发现, 超声 (US) 可以有效控制 AnMBR 膜污染; US-AnMBR 用于污泥消化具有高负荷、小体积的优点, 能同时进行污泥的浓缩、消化、脱水, 实现了污泥的稳定化处理目标, 因此具有广阔的研究和应用前景。

**关键词:** 剩余污泥; 厌氧膜生物反应器; 超声

**中图分类号:** X703.1

## The prospect about the US-AnMBR used for sewage sludge digestion

Sun Zheng<sup>1</sup>, Xu Dongyao<sup>1</sup>, Song Zhao<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Environment of CUMTB, Beijing 100083;

2. Century Architecture Magazine Publisher, Beijing 100190)

**Abstract:** In this paper, the current research about the anaerobic digestion of sewage sludge is studied; the research in progress concerning the use of AnMBR in sludge disposal field is summarized. The membrane fouling is the bottleneck constraint of AnMBR application. But in recent study, the ultrasonic coupled with the AnMBR can control the Membrane fouling well. The dominant of US-AnMBR system is that it could make the reactor smaller with a higher loading rate and it can realize sludge stabilization by sludge thickening, digesting and dewatering simultaneously in an reactor. For this reason, the promise of US-AnMBR used in sludge digestion has a vast potential.

**Keywords:** Sewage sludge; Anaerobic Membrane Bioreactor; Ultrasonic

## 0 引言

2009年2月, 住建部出台的《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策(试行)》中支出国家鼓励采用节能减排的污泥处理处置技术, 在污泥浓缩、调理和脱水等实现污泥减量化的常规处理工艺基础上, 根据污泥处置要求和相应的泥质标准, 选择适宜的污泥处理技术路线。鼓励城镇污水处理厂采用污泥厌氧消化工艺, 产生的沼气应综合利用。

厌氧膜生物反应器 (Anaerobic Membrane Bioreactors, AnMBR) 是将生物厌氧处理单元与分离膜组件相结合的新型水处理反应器。从 20 世纪 80 年代开始人们的研究多集中在用 AnMBR 处理高浓度有机悬浮废水, 固液分离效果好; 城市剩余污泥也是一种高浓度的悬浮废水<sup>[1]</sup>, 但用 AnMBR 处理剩余污泥的研究一直比较缓慢。本文基于此点, 希望开发一种高效的剩余污泥厌氧消化反应器, 解决目前剩余污泥处理中基建费用过高的问题。

## 1 剩余污泥厌氧消化处理的现状

### 1.1 剩余污泥的危害

世界上已建成的城市污水厂中有 90% 采用的是废水的生物处理法, 因为废水中有 60%

---

作者简介: 孙峥 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 污水污泥处理. E-mail: sunjon@126.com

的有机物用生物法去除才经济。我国的城市污水厂大多数采用的是传统的活性污泥生物处理方法,但该方法产生大量的剩余污泥。剩余污泥含有大量的有机物、丰富的氮磷等营养物、重金属以及致病菌和病原菌等;常常伴有恶臭气体,且数量巨大,增长迅速,是亟待解决的城市废弃物<sup>[2]</sup>。未经恰当处理处置的污泥进入环境后,直接给水体和大气带来二次污染,不但降低了污水处理系统的有效处理能力,而且对生态环境和人类的活动构成了严重的威胁,因此在污泥最终处置之前需要稳定化处理。

## 1.2 剩余污泥的厌氧消化

在污泥处理工艺中,厌氧消化也是较普遍采用的稳定化技术。国家鼓励城镇污水处理厂采用污泥厌氧消化工艺,产生的沼气应综合利用。根据《城市污水处理及污染防治技术政策》(建城[2000]12号)要求:日处理能力在10万m<sup>3</sup>以上的污水二级处理设施产生的污泥,宜采取厌氧消化工艺进行处理,产生的沼气应综合利用;污泥厌氧消化挥发性有机物降解率应>40%。

现有的厌氧污泥消化工艺主要有低负荷、高负荷、厌氧接触和分相消化等四种基本工艺。

表1 现有的厌氧污泥消化工艺  
Tab. 1 The existing sludge digestion technologies

厌氧污泥消化工艺		
工艺名称	优点	缺点
低负荷	最常规的工艺	消化效率低,运行不稳定
高负荷	采用单级或分级消化	二级池内污泥浓缩困难
厌氧接触	完全混合式反应器加回流	对毒物或负荷引起的冲击敏感
两相消化	酸发酵和碱发酵分在两个消化池	基建费用和操作费用增加

低负荷工艺是最普通的厌氧消化工艺,在这一构造中,污泥是间歇进入一个没有混合和加热的消化池,由于消化池内环境条件不易控制,消化过程不稳定,效率低。因此该工艺几乎不用于初沉池污泥的稳定化;若设置两级消化池,将剩余污泥和初沉污泥混合在一起,一级消化池把污泥浓缩到浓度为4%~6%,但二级消化池的固液分离效果差,重力浓缩也是很困难的。高负荷消化具有加热和搅拌,稳定的进料速度,污泥消化前经过浓缩。通过合理的设计和运行,整个消化池的大部分区域可以保持较一致的条件,从而使消化池体积减小,消化过程保持一定的稳定性,但由于进入消化池的污泥必须是浓缩后的污泥,这使得消化池本身的混合变得困难,因此该工艺对毒物或负荷的冲击很敏感。厌氧接触工艺相当于完全混合式活性污泥厌氧工艺。它起初用于高浓度溶解性废物的初步稳定化。消化污泥连续从消化池排出,部分回流至入口。由于厌氧消化污泥浓缩困难,因此厌氧接触工艺极少用于城市污水处理厂的污泥消化。二相消化即按厌氧消化的原理,使消化过程的两个阶段分别在两个消化池内进行,水解和酸化阶段在一个池中进行,甲烷化阶段在另一个池中进行。这一过程已在中试规模上得到验证,亦已用于大规模污水处理厂的污泥消化。二相消化过程可以减小消化池总体积,但基建费用和操作费用增加很多<sup>[3]</sup>。

AnMBR 在提高剩余污泥厌氧消化的效率,简化厌氧消化处理工艺的方面的研究及应用前景是本文要关注的目标。

## 2 AnMBR 优点及存在问题

### 2.1 AnMBR 的处理剩余污泥的优点

与其它的污泥厌氧消化工艺相比, AnMBR 具有以下优点<sup>[4]</sup>:

(1) 可以高效地进行固液分离, 在一个处理构筑内同时实现了剩余污泥的浓缩和初步脱水; 出水悬浮物和浊度接近于零。

(2) 通过膜的高效截留作用和回流系统, 使微生物完全截留在反应器内, 实现反应器污泥停留时间 (SRT) 和水力停留时间 (HRT) 完全分离; 反应器的泥龄可以很长, 使微生物在有限体积内可以有足够的生化反应时间, 而 HRT 却可以很短, 使反应器在高容积负荷、长泥龄下, 实现较少量的剩余污泥排放。

(3) 反应器内微生物浓度高, 不仅耐冲击负荷, 而其中积累大量的微生物和酶是生物化学反应的催化剂, 可以实现有机污染物的高效降解。

(4) 不需考虑反应器内活性污泥沉降性能问题, 不存在污泥膨胀和污泥流失问题。

(5) 占地面积小, 可以节省基建费用; 工艺设备集中, 便于实现全程自动化控制和日常运行管理。

### 2.2 AnMBR 处理剩余污泥的研究状况

剩余污泥是属于高悬浮固体废水, 因此, 本文先把关注点放在 AnMBR 处理高浓度悬浮固体废水领域。因为此类废水在厌氧消化时, 由于有机基质主要集中在悬浮固体中, 因此如何高效地降解悬浮固体是 AnMBR 要实现的目标。

1969 年, Smith 等研究了超滤技术用于活性污泥泥水分离, 处理污泥浓度为 10~15g/L, 过膜压差为 1.38~3.45KPa, 运行六个月后, BOD<sub>5</sub> 去除率达到 95%, SS 去除率为 100%。1970 年, Frederick 等研究了合成超滤膜处理浓缩后的活性污泥混合液, 该污泥浓度有 20~30g/L, 过膜压差为 3.41~5.17KPa, COD 去除率是 90%, 对于分子量大于 1000 的悬浮颗粒物质能完全阻留<sup>[5]</sup>。1982 年 Dorr-Oliver 公司研制了一个用于高浓度有机废水处理的膜厌氧处理系统 (Membrane Anaerobic Reactor System, MARS), 该工艺仅限于中试, 原因是当时膜组件成本比较高<sup>[6]</sup>。1983 年, 英国的 Choate 等人为了解决面粉厂出水有机物含量过高的问题, 在厌氧发酵罐之外加了一个管状超滤膜组件, 提高了出水水质, 并设置了回流系统, 使得膜组件分离的生物固体可以返回到消化罐内, 提高了生物固体的停留时间, 该系统的水力停留时间 (HRT) 维持在 4.5 天, 实现了稳定的操作运行<sup>[7]</sup>。南非 Membratex 公司在 1987 研制了厌氧超滤消化系统 (ADUF, Anaerobic Digestion Ultra-Filtration), 用于高浓度工业污水, 特别是食品和酿造业的污水处理; 该公司在此基础上开发了 BIOREK 工艺用于商业推广<sup>[8]</sup>。1986 年, Anderson 等通过对厌氧消化器加以改造, 用外置的微滤膜错流运转<sup>[9]</sup>, 解决了消化器内微生物流失的问题, 使反应器内的生物量得以保有, 从而提高了消化的效率, 这是 AnMBR 应用于污泥厌氧消化的雏形工艺。

Ross 等人在 1990 年将 ADUF 工艺用于污泥处理, 具体是把超滤膜分离技术与污泥的厌氧消化系统相结合, 试验采用的是管状膜组件, 污泥浓度范围在 30~50g/L 之间, 小试和中试都取得了较好的效果, 管状膜组件内压差为 400Kpa<sup>[10]</sup>。1990 年日本的 Eisuke Kayawake 研究了附加陶瓷膜的厌氧消化体系处理污泥的效果, 最高的负荷达到了 15.4 kg CODcr/m<sup>3</sup>·d, 膜通量为 0.06~0.11 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, CODcr 的去除率在 80%左右, 并通过循环消化气冲刷膜表面<sup>[11]</sup>, 进而提高产气量。1991 年日本武藏工业大学的 Aya 等人采用分离膜厌氧消化法处理城市污

泥的工艺,研究该工艺完全消化污泥的可能性,实验进泥选用初沉池污泥,浓度为15~30g/L,反应器内污泥浓度经超滤膜过滤浓缩后范围在30~60g/L之间,有机负荷率(OLR)达到了1.8gVS/(L·d);Aya研究了OLR和产气量的关系<sup>[12]</sup>。1994年韩国的Chang等人研究了用0.05 $\mu$ m的陶瓷膜处理含高悬浮固体的酒糟废水<sup>[13]</sup>,作为厌氧消化的前处理阶段,COD的去除率为50%,SS去除率几乎为100%,极大提高了后续厌氧消化的效率。

但是膜污染是AnMBR技术发展的瓶颈,1996年韩国首尔大学的Choo等人研究了AnMBR膜污染机理,发现膜污染主要来自外部因素,比如膜表面的微生物细胞沉积和磷酸氨镁等无机盐沉积<sup>[14]</sup>;韩国的Choo和Lee在对膜污染的详细分析后发现占总SS含量5%的细微胶体对膜过滤阻力的贡献率却达80%,是膜污染的主要物质;Choo发现较大孔径时膜污染与膜材料关系较大,亲水膜比憎水膜更容易污染。1996年,Beaubien等发现膜的运行性质与错流速度和污泥浓度有关,错流速度提高,膜通量也提高,在污泥浓度小于20g/L时,恒定膜通量与污泥浓度呈线性关系,在高混合液浓度时二者为半对数关系<sup>[15]</sup>。1999年法国的S. Elmaleh等评价了外置式厌氧膜生物反应器的性能,发现膜污染主要与微小生物颗粒在膜表面的分布有关<sup>[16]</sup>。1999年,文湘华等研究膜生物反应器动力学时发现,操作压力与膜通量有一定关系<sup>[17]</sup>。Lee等在2001年研究结果显示膜表面滤饼层的形成是膜污染的主要原因<sup>[18]</sup>。Chu和Li等在2005年研究发现,滤饼层不单是分布在膜表面,而且部分滤饼层用气流反冲洗造成的膜表面湍流也不能除去<sup>[19]</sup>。2007年Jeison研究了浸没式AnMBR,发现水力反冲洗并不能除去固着在膜表面的滤饼层<sup>[20]</sup>。Le-Clech等总结了膜污染的因素,概括为膜材料、微生物特性、进料液特性和操作条件,并指出污泥性质和进料和水力学条件决定了膜污染行为特质,但是由于进料污泥混合液性质的改变对膜污染有直接影响<sup>[21]</sup>。

几乎所有的AnMBR在构型上都是外置式的。之所以采用此配置方式是因为在反应器中缺少空气鼓泡,所以要通过水泵来进行液体循环以改善污染状况,其膜污染控制手段的研究主要集中于通过提高错流速度来改善膜表面的水动力条件,但动力消耗很高;在组件内部添加障碍物,提高湍流效果;引入临界通量概念优化运行条件;对膜材料进行优选,调理混合液等方面的研究也有报道,但迄今为止还未取得突破性的进展<sup>[22]</sup>。

### 3 超声清洗 AnMBR 膜污染的研究进展

#### 3.1 超声清洗作用的原理

频率高于2万Hz的声波成为超声波。超声波应用于清洗是基于其在介质传播中产生的空化作用。其原理是由超声波发生器发出的高频振荡信号,通过换能器转化成高频机械振动而传播到介质,超声波在清洗液中疏密相间的向前辐射,使液体流动产生数以万计的微小气泡,存在于液体中的微小气泡在声场的作用下振动,当声压达到一定值时,气泡迅速增长,然后突然闭合,在气泡闭合时产生冲击波,在其周围产生上千个大气压力,破坏不溶性污物而使它们分散于清洗液中,当团体粒子被油污裹着而粘附在清洗件表面时,油被乳化,固体粒子即脱落,从而达到组件表面清洗的目的<sup>[23]</sup>。

控制膜污染的方法大体上分为延缓膜污染速率和恢复膜通量两种。按操作方式具体分为物理清洗、化学清洗和生物清洗等<sup>[24]</sup>。

表 2 膜污染清洗方法  
Tab. 2 The method of membrane fouling clean

膜污染清洗方法		
物理清洗	优点	缺点
反冲洗	高速的料液或生物气流过膜过滤表面增加湍流度	容易造成膜破损
等压清洗	降压操作后使膜两侧压差相等后；适用于中空纤维膜	影响系统稳定
负压清洗	使膜的透过侧压力高于膜表面，透过液回流冲去污染物	操作复杂
机械刮擦	适用于大的管式膜组件，用带塑料泡沫机械刮杆	容易堵塞
超声清洗	适宜在线清洗，利用超声空化破碎生物微粒，振落滤饼层	有噪声和能耗
气液混合	通入压缩空气，抖落附着的污染物	能耗高
化学清洗		
碱清洗剂	氢氧化物和磷酸盐类，对蛋白和脂类有一定效果	清洗物质有限
酸清洗剂	硫酸、盐酸、硝酸等、用来清洗无机污垢和膜孔堵塞	有腐蚀性
表面活性剂	改善清洗剂与膜污染层的接触	要附加酸碱清洗剂
消毒剂	在消毒的同时有效去除有机污染物，包括 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 和次氯酸钠	强氧化性
生物清洗		
酶制剂	具有生物活性，可有效去除蛋白类物质	价格贵，反应速度慢

### 3.2 超声在强化膜分离中的应用研究

研究表明，适宜的超声条件对膜污染的发展有较好的控制效果，可以有效地提高渗透通量。在低频超声范围内，随着超声电功率的升高，超声能量密度增加，各种物理效应和化学效应都不断增强，首先超声声波在水中的机械振动引起膜的抖动，有利于污染物从膜表面脱落，其次超声在膜表面的固液边界层产生微湍流现象，起到了很好的混合搅拌作用，控制了浓差极化的发展，最后超声的空化效应有效地冲击膜表面的污染层，使得滤饼层松动，伴随产生的羟基自由基同时可以氧化去除凝胶层<sup>[25]</sup>。但超声对混合液性质也有比较大的影响，会导致污泥粒径减小，过滤性能变差，不利于膜污染的控制。而且超声功率越大或时间越长，对混合液的性质影响越显著<sup>[26]</sup>。因此，在考虑超声有效控制膜面污染层发展的同时也要考虑超声对混合液性质的影响，以选取控制膜污染发展的最优条件<sup>[27]</sup>。Muthukumaran 等研究超声时间分别为 10min, 20min 和 30min 时膜通量的恢复情况，超声 10min 并不比长时间的效果差，表明膜通量的恢复程度基本不受时间的影响<sup>[28]</sup>。隋鹏哲等研究表明，150W 的电功率和 0.75m/s 的错流速度下，超声可以使膜阻力稳定在  $5 \times 10^{11} \text{m}^{-1}$ ，减缓了膜的清洗频率，利用超声可以有效控制 AnMBR 的膜污染发展。达到单纯水力控制时，1.0m/s 以上错流速度相当的污染控制效果<sup>[29]</sup>。

## 4 结论

Tiehm 等研究了超声破解污泥，促进污泥消化的机理；发现由于超声击破污泥、释放其中的生物酶，使更多的固相转化气相<sup>[30]</sup>，宏观上沼气产量增加，可以提高污泥的产沼气量和发电量 30%。在超声有效控制 AnMBR 膜污染的研究基础上，许美兰等试验研究了用于污泥消化的高负荷在线超声厌氧膜生物反应器，并在 2009 年 IWA 污泥会议上提到了其中的污泥浓度最高达到了 60g/L，实验虽处于试验阶段<sup>[31]</sup>，但该工艺有广阔的前景；李玉山在其硕士论文中也提到了 CSTR 型式的超声厌氧膜生物反应器(US-AnMBR)处理剩余污泥的效果，研究表明超声对污泥消化有促进作用，在其实验条件下，VS 降解率达到了 52.3%，并对反应器的超声条件和 HRT 进行了优化<sup>[32]</sup>。

因为超声对污泥的击破作用，促进了污泥在消化工艺中的水解过程，这样污泥在消化工

艺中的停留时间大大缩短(减少一半的停留时间),提高了消化段的处理能力,许美兰等研究表明在稳定的高负荷条件下(3.0gVS/(L·d)),超声 AnMBR 的污泥的降解率达到了 67.5%,消化污泥实现了良好的稳定化。超声-厌氧膜生物反应器实现了污泥高效率的浓缩、初步脱水和厌氧消化一体化,达到了污泥减量化稳定化的处理目标,具有节省土地和基建费用的优势;便于自动化管理,随着膜技术的不断完善、膜价格的不断降低,US-AnMBR 在新型高效污泥厌氧消化工艺中具有广阔的应用前景。但仍需要研究的是超声换能器如何与膜组件组合布置,以降低超声的能耗,并如何更好地与污泥处置工艺有效衔接,在以后中试中都需要研究。

### [参考文献] (References)

- [1] 顾国维, 何义亮. 膜生物反应器——在污水处理中的研究和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 胡纪萃等. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] 赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [4] Tom Stephenson 等著, 张树国, 李咏梅译. 膜生物反应器污水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [5] C. Smith, D. Di Gregorio and R.M. Talcott, *The use of membranes for activated sludge separation* 24<sup>th</sup> annual Purdue Industrial Waste Conference, Purdue University, Lafayette, Indiana, USA (1969), pp. 1300–1310.
- [6] Strohwald, N.K.H., and Ross, W.R., and Brindle, Application of ADUF process to brewery effluent on a laboratory scale[J]. *Water Sci. Technol.* 1992,25(10),95
- [7] Choate W T, Houldsworth D, Butler G A. Membrane-enhanced anaerobic digesters[A]. Proceedings 37<sup>th</sup> Industrial Waste Conference[C]. Purdue University . 1982, 09,661-666.
- [8] Ross, W.R., Barnard, J.P., le Roux, J. and de Villiers, H.A. Application of ultrafiltration membranes for solids-liquid separation in anaerobic digestion systems: the ADUF process[J]. *Wat. SA*, 1990,16(2), 85–91.
- [9] Norddahl B., and Rohold L. The Biorek<sup>R</sup> concept for the conversion of organic effluent to energy, concentrated fertilizer and potable water[OL]. <http://www.bioscan.dk/The%20BIOREK%20may%202000.pdf>. 2000.
- [10] Ross W R , Barnard J P, Le Roux, J. *et al.* Application of ultrafiltration membranes for solids-liquid separation in anaerobic digestion systems: the ADUF process[J]. *Wat. SA*, 1990,16(2), 85–91.
- [11] Eisuke Kayawake, Yoshihisa Narukami, Masatsugu Yamagata. Anaerobic digestion by a ceramic membrane enclosed reactor[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering.* 1991, 71(2), 122-125
- [12] Aya, H., and Namiki, K. Anaerobic digestion of sewage sludge by membrane separated bioreactor, Mizu Kankyo Gakkaishi(Japanese)[J]. 1992,15,187
- [13] Chang I.-S., Choo K.-H., Lee C.-H., Pek U.-H., Koh U.-C., Kim S.-W. and Koh J.-H. (1994) Application of ceramic membrane as a pretreatment in anaerobic digestion of alcohol-distillery wastes. *J. Membr. Sci.* 90,131-139
- [14] Kwang-Ho Choo, Chung-Hak Lee. Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor[J]. *Water Research.* 1996, 30(8), 1771-1780
- [15] A. Beaubien, M. Bâty, F. Jeannot, E. Francoeur, J. Manem. Design and operation of anaerobic membrane bioreactors: development of a filtration testing strategy[J]. *Journal of Membrane Science.* 1996,109(2), 173-184
- [16] Elmaleh, S. and Abdelmoumni, L. (1998) Experimental test to evaluate performance of an anaerobic reactor provided with an external membrane unit. *Wat. Sci. Technol.* 38(8-9), 385~392.
- [17] Wen, W., Xing, C. and Qian Y. A kinetic model for the prediction of sludge formation in a membrane bioreactor. *Process Biochem.* 1999,35,249~354
- [18] Lee, J., Ahn, W.-Y., Lee, C.-H. Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor. *Water Research*, 2001, 35 (10), 2435–2445.
- [19] Chu, H.P., Li, X.Y. Membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR): sludge cake formation and fouling characteristics. *Biotechnology and Bioengineering*[J]. 2005,90(3), 323–331.
- [20] Jeison, D., van Lier, J.B. Cake formation and consolidation: main factors governing the applicable flux in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) treating acidified wastewaters[J]. *Separation and Purification Technology.* 2007,56 (1), 71–78.
- [21] Le-Clech, P., Chen, V., Fane, T.A.G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*[J]. 2006,284 (1–2), 17–53
- [22] 隋鹏哲, 文湘华, 黄霞. 厌氧膜-生物反应器中超声控制膜污染研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 7 (4) : 25~29
- [23] Bien, J.B., Kempa, E.S., Bien, J.D.. Influence of ultrasonic field on structure and parameters of sewage sludge for dewatering process[J]. *Water Sci. Technol.* 1997, 36 (4), 287–291.
- [24] 耿峰. 膜污染防治与清洗[J]. *化工生产与技术.* 2006(13), 6, 43-46
- [25] Sabri N , Pikonen P , Sekki H. Ultrasonically enhanced membrane filtration of paper mill effluent[A]. Proceedings of First Conference on Applications of Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing[C]. France Toulouse : 1997. 99~103.
- [26] 陈福泰, 范正虹, 吴金玲等. MBR 的在线超声清洗效果及对混合液性质的影响[J]. *中国给水排水*, 2008,

24 (5) : 40~44

[27] Chai X, Kobayashi T, Fujii N. Ultrasound effect on crossflow filtration of polyacrylonitril ultrafiltration[J]. J. Membr. Sci. , 1998 ,148 (1) :129~135

[28] S. Muthukumar, K. Yang, A. Seuren *et al.* The use of ultrasonic cleaning for ultrafiltration membranes in the dairy industry [J]. Separation and Purification Technology , 2004,39 :99~107

[29] Pengzhe Sui, Xianghua Wen, Xia Huang. Feasibility of employing ultrasound for on-line membrane fouling control in an anaerobic membrane bioreactor[J]. Desalination, 2008, 219(1-3), 203-213.

[30] Tiehm A, Nichel K, Zellhorn M, et al. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. Wat Res. 2001, 35 (8) : 2003-2009

[31] Meilan Xu, Xianghua Wen, Xia Huang, Yushan Li. Digestion of Waste Activated Sludge by an Anaerobic Membrane Bioreactor Coupled with Online Ultrasonic Equipment[A]. The 12<sup>th</sup> IWA-Sludge Conference Sustainable Management of Water and Wastewater Sludges[C]. 2009.

[32] 李玉山, 韩虹林. 在线超声厌氧膜生物反应器处理污泥[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.