

· 综 述 ·

## 超声强化技术在水处理中的应用研究进展

杨 婷<sup>1</sup>,高乃云<sup>1</sup>,严汉林<sup>2</sup>

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092; 2. 江苏省建工集团,南京 210036)

**摘要:** 作为高级氧化技术,超声空化产生无选择性的强氧化性自由基,具有较大优势,但由于超声空化机理的特点使得有机物的完全矿化受到限制,而提高超声效率的常见方法有:优化频率、声强,与其他技术组合等。文章主要从超声波参数,添加剂,超声-高级氧化技术、超声-活性炭、超声-微生物处理、超声-石墨、超声-气浮、超声-膜处理、超声-混凝、超声-消毒技术等方面综述了超声强化技术原理及其在水处理中的应用研究进展。其中研究较少的方法有间歇超声、多频超声、充入多种气体以及超声与各工艺组合,如超声与活性炭、等离子体技术等组合,这些强化技术都一定程度的强化了超声效果。有些组合暂时未用于水处理,但经过完善也将大大催进水处理事业的发展。虽然超声波具有较大优势,但是由于其成本高,反应器生产技术限制,超声波大规模用于实际生产还需要较长一段时间。

**关键词:** 高级氧化技术; 强化超声; 超声波组合; 技术组合

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1001-3644(2011)06-0133-06

### Advances in Application of Ultrasonic Enhancement Technology in Water Treatment

YANG Ting<sup>1</sup>; GAO Nai-yun<sup>1</sup>; YAN han-lin<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

*2. Jiangsu Construction Engineering Group Co. Ltd, Nanjing 210036, China)*

**Abstract:** As an advanced oxidation process, ultrasonic cavitation creating radicals, which have great advantage of nonselective strong oxidization. However it limits the complete mineralization of organics resulting from its characteristics. The common ways to improve the ultrasonic efficiency includes optimizing ultrasonic frequency and intensity and some other combined technologies else. This article mainly summarizes the mechanism and application progresses in application of ultrasonic enhancement technology in water treatment from the respects such as parameters of the ultrasound, additives, ultrasonic advanced oxidation technology, ultrasonic activated carbon, ultrasonic microbial treatment, ultrasonic graphite, ultrasonic flotation, ultrasonic membrane, ultrasonic coagulation and ultrasonic disinfection, which includes some seldom researched respects such as intermittent ultrasound, multi-frequency ultrasound, process by adding multi-gas as well as ultrasound combining with other processes such as ultrasound-activated carbon and ultrasound-plasma technology which strengthen the ultrasonic technology. Although some of them haven't been used in water treatment, with development and improvement, they will promote the development of the water treatment. In spite that the ultrasonic technology has great advantage in water treatment, it is restricted by its high cost and limitation of reactor manufacture. Therefore, there is still a long way to widely apply ultrasonic technology in water treatment.

**Keywords:** Advanced oxidation process; ultrasonic enhancement technology; combination of ultrasound; combined technology

收稿日期: 2011-05-16

基金项目: 高藻、高有机物湖泊型原水处理技术集成与示范(2008ZX07421-002)。

作者简介: 杨婷(1987-),女,江西吉安人,同济大学环境科学与工程学院市政工程专业2009级在读硕士研究生,研究方向为太湖水常规深度处理等。

超声波是频率高于20000 Hz的声波,具有方向性好,穿透能力强,易于获得较集中的声能,在水中传播距离远,且因其频率下限接近人的听觉上限而得名。超声波的应用很广泛。超声波在水处理中的作用机理及影响因素已有很多的研究,但是常

规超声处理作用往往有限或者成本奇高。而强化超声不仅提高了超声处理的效率且在一定程度上降低了超声水处理的成本。虽然相对其他类似处理成本还是比较高,但随着研究的深入,技术的发展,可以相信强化超声技术在水处理中将有极大地应用前景。

## 1 超声强化技术的基本原理

本文综述的强化超声技术主要包括以下几个方面: 超声空化效应的强化, 超声-高级氧化技术组合强化, 超声-其他水处理技术强化。

间歇式或脉冲式超声波为 $\cdot\text{OH}$ 提供一段反应时间, 减少了 $\cdot\text{OH}$ 因累积而自组合的概率以达到强化超声的效果。而调制超声波则是由于高声强的超声波负责降解有机物而低声强的超声波负责振动传质的协同作用以达到提高超声效果的。多频超声强化的原理为单频产生的空化泡中有效空化泡数量有限, 采用多频组合技术能增加有效空化泡数量, 提高超声空化产率。添加剂强化超声的原理为无机盐类通过影响有机物在溶液中的分配系数, 增强有机物的疏水性, 从而增加有机物被氧化的几率, 且离子强度越大这种作用越强, 有机物去除率越高; 但是某些无机离子还能清除 $\cdot\text{OH}$ , 这类离子会通过减少 $\cdot\text{OH}$ 的浓度从而在一定程度上抑制有机物的去除; 而催化剂主要是利用本身特性提高超声空化过程中 $\cdot\text{OH}$ 的浓度以达到强化作用的; 由于 $\text{O}_2$ 在空化过程中能产生 $\cdot\text{OH}$ , 所以充入 $\text{O}_2$ 时有机物降解的速率常数要大于 $\text{He}^{[1]}$ , 而 $\text{Ar}$ 具有更高的绝热系数更有利于以热解为反应机理的有机物的降解, 所以采用适当比例混合的 $\text{Ar}/\text{O}_2$ 将是更经济有效的强化方法。

超声-高级氧化技术联用就是利用高级氧化技术氧化非挥发性亲水性有机物以提高超声处理效果的, 且超声的振动促进传质作用进一步提高超声效果。而超声与常规处理技术联用如超声-微生物处理利用超声提高了微生物细胞的通透性, 促进细胞内外的传质以达到提高超声效果的目的; 超声-活性炭及超声-膜处理都是利用超声波对活性炭或膜的改性作用、传质作用及吸附截留一些超声不能降解的有机物以提高超声效果的; 超声-混凝组合技术是利用超声空化的化学原理以破坏藻类细胞的气囊协同混凝效果以达到强化作用的而超声波与其他消毒技术的联用作用原理则是超声空化产生的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 及其强氧化性氧化有机物以降低消毒剂的用量, 此外其他消毒技术能杀灭超声不能杀灭的微生物

以达到强化作用的; 超声与其他技术联用的强化原理主要也是超声与组合技术间的协同作用。如超声-石墨组合技术利用超声的震动传质及微射流破碎石墨以增加石墨比表面积促进石墨的吸附作用, 外加石墨吸附一些超声不能降解的有机物以提高超声效果; 超声-等离子体技术也是利用超声及等离子体技术各自的氧化特性相互补充以达到强化作用的<sup>[22-30]</sup>。

## 2 超声强化技术的研究进展

### 2.1 超声空化效应的强化

#### 2.1.1 超声波参数的强化

大量文献研究普通连续式超声波在水处理中的作用, 而王双维等<sup>[2]</sup>用不同声强的射频脉冲式超声波, 辐射对苯二甲酸, 发现存在最佳脉冲宽度范围为 $10 \sim 100 \text{ ms}$ 。此外, 调制的矩形超声波(一个周期内存在两个声强值, 交替变换)通过适当调整超声波的声强也可提高超声波降解有机物的效率。冯若等<sup>[3]</sup>发现保持调制的矩形超声波中较大声强( $I_{\text{max}}$ )不变,  $I_{\text{min}}$ 变化至空化阈值附近时, 空化效率出现最小值。两声强相差越大空化效率越高。

此外, 常规的超声水处理技术多采用单频, 但冯若等<sup>[3]</sup>研究发现: 多频共同作用的空化产率是单个频率的空化产率之和的 $1 \sim 3$ 倍, 通过对比还发现低频(kHz)与高频(MHz)的多频组合空化产率比纯低频或纯高频组合空化产率高, 三频组合优于双频组合。我们认为三频组合与双频最优组合的空化产率可能会相差不大, 组合的频率再多只会相会抵消并产生雾化从而降低超声效率。所以强化超声波时根据实际情况选择双频或三频即可。

由超声空化组合现象我们知道, 不同声强的超声波之间也有协同作用, 所以脉冲宽度相同, on/off同步的低声强高频与高声强低频的超声波组合可能会有很大的强化作用。但这个方面仅有个别研究不到, 尚需经过实验进一步验证。

#### 2.1.2 外加添加剂的强化技术

某些无机盐类也会影响超声效率。如Wang等<sup>[4]</sup>研究发现在 $\text{TiO}_2$ 存在的情况下, 超声空化效果随 $\text{NaCl}$ 及 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 的增加而降低。

此外, 加入催化剂也是提高超声空化效率的手段之一。除加入Fe系催化剂外, 常用于超声水处理的催化剂还有 $\text{TiO}_2$ 。有研究表明掺杂Cr的 $\text{TiO}_2$ 催化剂比掺杂相同量的Co的催化剂的催化活性强且都强于纯 $\text{TiO}_2$ <sup>[4]</sup>, 掺杂Au元素后超声波降解染料分子的效率也大大增大, 如Wang等<sup>[5]</sup>实验发

现, 超声处理中加入掺杂 Au 的催化剂时, 在对染料分子处理 180 min 后, 染料分子被完全去除, 而加入纯  $\text{TiO}_2$  催化剂时只有 20% 的去除率, 不加催化剂时对染料分子去几乎没有去除效果。通过改性还可以扩大  $\text{TiO}_2$  对光线的利用范围, 可以实现对太阳光的利用, 这种改性非均相  $\text{TiO}_2$  适合于开放式的反应器, 降低能耗且增加有机物去除率。

此外, 由于  $\text{TiO}_2$  不仅产生空穴具有氧化性, 还同时产生电子又具有还原作用。且氧化还原反应同时发生减少了空穴-电子重组, 起到相互促进的作用。可以看出  $\text{TiO}_2$  在超声水处理中具有较大优势。除常用的 Fe 系催化剂和  $\text{TiO}_2$ , 还有人研究非均相铜系催化剂, 但其可能会对水质产生负面影响, 所以暂未发现有用于饮用水处理的文献。

虽然添加催化剂增加了药剂费, 但根据 Brenner D H 等<sup>[6]</sup>的研究结果发现用  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SBA}-15$  介孔非均相催化剂促进水中苯酚的超声降解, 显著提高了 TOC 去除率, 且可重复使用, 重复使用 5 次的催化剂催化活性几乎不变。所以引入非均相催化剂的强化技术具有广阔的前景。

针对上述研究我们可以想象引入能应用太阳光且能有效防止  $\cdot\text{OH}$  自组合的非均相介孔  $\text{TiO}_2$  催化剂将具有较大发展前景。

现阶段的研究主要是针对单一空化气体对超声空化的影响, 而 Jun Liang 等<sup>[7]</sup>研究气体种类对 500 kHz 超声降解 4-氯-2-甲基苯氧基乙酸 (MCPA) 的影响发现  $\text{O}_2$  的效果优于 Ar, 而充入 Ar 时脱氯及 TOC 去除速率大于充入  $\text{O}_2$  等其他气体。此外在 Ar/ $\text{O}_2$  (体积比 60:40) 系统中, MCPA 降解速率更高。总的来说选择气体及其混合比例时应根据具体反应机理, 经技术经济比较后确定。

有机物降解互相间主要是竞争关系, 但也有可能存在促进作用。因此引入某类易于去除 (如被一般方法即可高效去除) 的有机物来促进难降解的有机物的去除可能会有一定的发展前景, 如不同废水选择性混合处理。这种协同作用在水处理的超声强化技术中

的应用目前只是一种假设, 需要进一步研究。

## 2.2 组合强化技术

超声波空化机理决定超声容易去除疏水、挥发性有机物, 但是反应过程中会生成一些亲水性非挥发性甚至有害的有机物很难被超声降解, 从而抑制了有机物的彻底矿化, 因此需要超声波与其他技术组合来改善这种情况。常见的组合有超声-高级氧化技术组合, 如: 超声-微波技术组合、超声-UV 组合、超声-Fenton 组合、超声- $\text{O}_3$  等两项甚至是多项组合, 除此之外超声还可以和一些常规处理工艺连用, 如超声-微生物处理、超声-活性炭处理、超声-膜处理、超声-混凝、超声波与  $\text{Cl}_2$  等一些消毒技术的组合等, 这些组合是利用超声与常规处理工艺的协同作用以提高超声效果的。最后还有一些水处理中应用较少的技术联用, 如: 超声-石墨、超声-等离子体技术等, 虽然有些技术还未直接应用于水处理中但可以用于催化剂的生成制备, 并且随着技术的发展会在水处理中起到一定的作用。

### 2.2.1 超声-高级氧化技术

超声-高级氧化技术主要是利用高级氧化技术氧化降解超声过程中产生的亲水非挥发性有机物以提高 TOC 去除率, 彻底矿化有机物。

Torres 等<sup>[8]</sup>对比了单独的超声、UV 与超声-Fe (II)、超声-UV、超声-Fe (II)-UV 组合对 BPA 的去除率发现: 单独的超声与其他组合在去除 BPA 时去除效果相差甚微, 但是超声-Fe (II)-UV 在 240 min 内能达到完全矿化 BPA, 前 3 种方法在处理 480 min 后对 TOC 去除率仍不到 50%。从经济上考虑, Torres 等还对比了上述几种组合的能量消耗 (如下表) 发现: 在 TOC 去除率达到 60% 时, 超声-Fe (II)-UV 处理单位体积水所耗能量最少, 才 1033  $\text{kWh}/\text{m}^3$ 。Ioan 等<sup>[9]</sup>、Lin 和 Ma<sup>[10]</sup>研究发现组合工艺在处理非挥发性亲水性有机物上具有较大优势。同理超声/ $\text{O}_3$  组合工艺优于单独工艺, 且先超声后臭氧或者先臭氧后超声对有机物的去除率都比超声、臭氧同时作用去除率低<sup>[11][12]</sup>。

表 各工艺耗电费用的比较<sup>[8]</sup>

Tab. Comparison the electric costs of different processes

工 艺	BPA ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ )	功 率 (W)	体 积 (mL)	时 间 (min)	TOC 去除率	EE/O ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ )
UV	118	25	300	600	小于 60%	
超声	118	80	300	600	小于 60%	
超声/Fe (II)	118	80	300	600	64	6010
超声/UV	118	105	300	300	66	3735
超声/UV/Fe (II)	118	105	300	120	79	1033

EE/O = 1000Pt / [60V \* log (Ci/Cf) ]

### 2.2.2 超声-微生物处理

超声波与微生物组合技术主要利用超声波的物理化学性质改善微生物细胞膜的通透性,促进微生物的生物活性,此外超声波还能促进传质,打破矾花等大颗粒胶团,释放有机物为微生物的生命活动提供能量,将超声波引入活性污泥法中能显著地促进污泥中微生物的新陈代谢,促进有机物的降解。但同时要注意高密度超声将会引起微生物细胞的裂解,不仅降低了污泥中微生物含量还增加了水体中有机物含量<sup>[13]</sup>。所以应根据不同要求选择不同声强的超声波。此外还有研究表明间断的引入超声波将比引入连续超声波更有效。

根据超声波对微生物的不同作用,还能用于某些水处理过程的微生物筛选过程。Yan等<sup>[14]</sup>研究发现超声预处理后再发酵能显著提高挥发性有机酸的积累量,促进氮磷的去除。

### 2.2.3 超声-活性炭处理

超声波与生物活性炭连用的技术中超声波加速溶液中传质过程,并能将不能被活性炭吸附的大分子降解为小分子,进一步被活性炭吸附从而提高吸附效率。此外猜测超声波可能能在活性炭表面激发一些活性基团或者激发活性炭表面的活性位置,增大活性炭吸附容量,这点有待进一步的研究。活性炭投量对吸附效率有显著影响:活性炭为超声空化提供空化核,但同时过多的活性碳也会阻碍超声波在水中的传递。所以活性炭投量需要通过实验确定<sup>[15]</sup>。

### 2.2.4 超声-膨胀石墨处理

膨胀石墨是一种新型多种碳系吸附材料,具有低密度,无毒无污染处理简单的优点。膨胀石墨可用于水中重油的去除,Li<sup>[16]</sup>等用超声-膨胀石墨连用技术去除污水中偶氮染料直接耐酸大红4BS时发现,单独超声几乎没有脱色效果,单独石墨处理120min后去除率为28.9%,但是超声-石墨的组合120min后去除率为94.05%,作者认为这是由于超声破碎了石墨颗粒时石墨粒径变小,增大了有效石墨表面积。但作者认为这还以超声促进传质有很大关系。

### 2.2.5 超声-膜处理

超声波与膜处理的联用技术与超声-活性炭处理联用技术的作用机理相似,除加速传质外,超声波还能改善膜的性质。该技术优势有减少膜污染、膜堵塞问题,加大膜的过膜通量,使得膜使用周期变长,降低反冲洗费用。超声对于膜污染控制主要

是因为超声空化产生的振动及微射流及部分有机物的氧化。超声膜处理要注意超声密度以免过强的超声波振动使膜破损或氧化膜的组成部分,减少膜使用寿命。但Chen等研究发现在他们的实验条件下并未发现膜破损问题。Liu等<sup>[17]</sup>研究发现超声波有助于中空纤维的内腔真空度,促进传质过程,同时在声强为 $12.69\text{W}/\text{cm}^2$ 时辐射超声60min后膜已经受损。

### 2.2.6 超声-浮选法

浮选法主要是利用物质表面物理化学性质不同与可浮性不同对物质进行分选的方法。超声浮选还主要应用于选矿等。Altun等<sup>[18]</sup>在超声作用下对油页岩进行浮选发现超声有效提高了油页岩浮选清洗效果,提高回收率。但作者认为超声-浮选技术也可以用于催化剂、活性炭、填料等的再生,或者用于填料悬浮的流动床中,可以延长填料使用时间,提高反应器的作用效果。此外还可以考虑超声-气浮法的组合在含藻水处理中的应用,选择声强合适的超声作用适当时间可以增大气体附着面积,增大气浮效果,又不破坏藻细胞,提高除藻率。

### 2.2.7 超声-混凝技术

超声-混凝技术用于含藻水的处理时需预处理抑制藻类生长,但是一些氧化抑制法往往会使得藻细胞的破碎并释放藻毒素。而超声-混凝技术处理含藻水时,低声强超声波会破坏藻细胞内的气囊,有效抑制藻类细胞的生长且不破坏藻细胞所以超声-混凝能有效处理含藻水。Liang等<sup>[19]</sup>实验发现超声混凝处理含藻水最佳声强为60W,时间为15s,超过则释放藻毒素。

### 2.2.8 超声-其他消毒技术

超声用于消毒时选用的是高密度超声波,主要机理是超声波的机械效应能破碎微生物细胞,产生的自由基及高温高压条件促进微生物的灭活,空化过程中形成的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 是很强的杀菌剂,也一定程度的促进了消毒效果。此外超声波因破碎菌胶团矾花等颗粒使得微生物彻底暴露从而消毒更彻底。由于单独的超声消毒适合处理较大的微生物如浮游动物(6~19J/ml超声波处理3~9s便能杀灭将近90%<sup>[20]</sup>),而对于较小的微生物如细菌则需要更大的声强及更长的时间,所以需要采用超声- $\text{Cl}_2$ 等的组合技术。

超声空化还能降解一部分有机物从而减少氯气用量,减少消毒副产物的生成。 $\text{Cl}_2$ 则能氧化超声波不能杀灭的较小的微生物,从而大幅提高消毒效

果。超声 -  $\text{Cl}_2$  组合消毒效果明显优于单独超声或  $\text{Cl}_2$  消毒的效果。此外 Phull S S 等还发现先超声后氯化的效果最佳。因为先氯化后超声, 超声波会释放水中溶解的氯气, 如果延长先氯化后超声时两种操作间的时间间隔能有效控制余氯量, 降低消毒副产物的产生, 但是延长时间间隔就需要更长的停留时间, 提高成本。

Chen 等<sup>[21]</sup>还研究了一种新型的消毒技术, 超声 - 等离子体联用技术的消毒效果。结果表明在不曝气的情况下联用技术的消毒效果优于单独超声与单独等离子体技术的效果之和。因为文献中只是在有限条件下 (实验控制因素少, 反应器奇小等) 针对大肠杆菌和酵母菌的研究, 所以未体现出联用技术的优势, 但这种联用技术中等离子体化学的特点决定其定能促进水处理技术的发展。

### 3 超声强化技术在水处理中的实际应用

由于超声波发生器的制备技术限制加上技术经济因素, 本文中的超声组合强化技术在水处理中的应用都是处于实验室研究水平, 距实际大规模生产应用还有一段距离。其中有些技术还并未用于水处理, 如超声 - 浮选法, 现主要用于选矿, 暂时还未用于水处理, 其在水处理中的应用也只是一项猜测。

### 4 结 语

超声波在水处理中的具体机理目前还未达成一致的看法。尽管如此根据现阶段的一些研究成果, 我们认为提高超声处理效率的方法可以综合为如下结论<sup>[30~35]</sup>:

(1) 根据具体情况通过实验选出最佳类型超声波, 条件允许可以选择多频、多声强的矩形脉冲超声波组合。如: 高频低声强的矩形脉冲波与低频高声强矩形脉冲波组合, 且尽量使两超声波声强相差较大, 脉冲宽度相同。

(2) 选择反射能力好的反应器, 可以选择多边形反应器, 反应器内部用反射性能好的耐腐蚀材料。通过所选超声波及处理水量等考虑反应器尺寸及类型;

(3) 通过技术经济比较调整溶液含盐量及种类、表面活性剂量, 温度和 pH。一般来说可以考虑加入一定量  $\text{Cl}^-$ , 降低表面催化剂含量 (稀释),

使溶液略呈酸性, 由于反应过程中会放出一定量的热量所以要考虑温度是否过高抑制超声空化的可能, 一般反应器外侧应有冷却装置。

(4) 考虑到溶液性质对催化剂有影响, 所以应综合考虑溶液性质, 选出最佳催化剂种类及催化剂投量。建议选用易分离的非均相改性催化剂, 主要为改性  $\text{TiO}_2$  催化剂, 并经超声波适当处理后重复使用。

(5) 在经济允许时, 可首选  $\text{O}_3$  为补充气体, 即可提供空化泡所需气体还可以提高氧化能力, 但是应考虑过多  $\cdot\text{OH}$  重新组合的可能性。

(6) 由于超声处理成本高, 所以可以采用超声与其他常规处理连用技术, 连用技术中超声作用时间很短, 如超声 - 混凝, 超声 - 膜处理等, 成本相对较低且处理效果好。还有一些连用技术现阶段还没有用于水处理中但是随着技术的发展及认识的深入, 必然会在水处理中占据一定的位置, 为水处理开辟新的道路。

### 参考文献:

- [1] Inez Hua, Micheal R Hoffmann. Optimization of Ultrasonic Irradiation as an Advanced Oxidation Technology [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31: 2237-2243.
- [2] Shuangwei Wang, Ruo Feng, Xiping Mo, Study on "pulse cavitation peak" in an ultrasound reverberation field [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1996, 3: 65-68.
- [3] Ruo Feng, Yiyun Zhao, Changping Zhu, et al. Enhancement of ultrasound cavitation yield by multi-frequency sonication [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2002, 9(5): 231-236.
- [4] Jun Wang, Yanhui Lv, Zhaohong Zhang, et al. Sonocatalytic degradation of azo fuchsine in the presence of the Co-doped and Cr-doped mixed crystal  $\text{TiO}_2$  powders and comparison of their sonocatalytic activities [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170: 398-404.
- [5] Yifeng Wang, Dan Zhao, Wanhong Ma, et al. Enhanced Sonocatalytic Degradation of Azo Dyes by Au/ $\text{TiO}_2$  [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42: 6173-6178.
- [6] Bremner D H, Molina R, Martinez F, Melero J A, Segura Y. Degradation of phenolic aqueous solutions by high frequency sono-Fenton systems (US- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SBA}-15\text{-H}_2\text{O}_2$ ) [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2009, 90: 380-388.
- [7] Jun Liang, Sergey Komarov, Naobito Hayashi, et al. Recent trends in the decomposition of chlorinated aromatic hydrocarbons by ultrasound irradiation and Fenton's reagent [J]. Journal of material cycles and waste management, 2007, 9: 47-55.
- [8] Ricardo A Torres, Christlan Petrier, Evelyne Combet, et al. Bisphenol A Mineralization by Integrated Ultrasound - UV - Iron (II) Treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2007,

- 41: 297-302.
- [9] Iordache Ioan, Steven Wilson, Elsa Lundanes, et al. Comparison of Fenton and sono-Fenton bisphenol A degradation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 142: 559-563.
- [10] Jun Liang, Sergey Komarov, Naohito Hayashi, et al. Recent trends in the decomposition of chlorinated aromatic hydrocarbons by ultrasound irradiation and Fenton's reagent [J]. *Journal of material cycles and waste management* 2007, 9: 47-55.
- [11] Timothy Lesko, Agustin J. Colussi, Micheal R. Hoffmann. Sonochemical Decomposition of Phenol: Evidence for a Synergistic Effect of Ozone and Ultrasound for the Elimination of Total Organic Carbon from Water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40: 6818-6823.
- [12] Timothy Lesko, Agustin J. Colussi, Micheal R. Hoffmann, Sonochemical Decomposition of Phenol: Evidence for a Synergistic Effect of Ozone and Ultrasound for the Elimination of Total Organic Carbon from Water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40: 6818-6823.
- [13] Vincenzo Naddeo, Vincenzo Belgiorno, Milena Landi, et al. Effect of sonolysis on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability [J]. *Desalination* 2009, 249: 762-767.
- [14] Yuanyuan Yan, Leiyu Feng, Chaojie Zhang, et al. Ultrasonic enhancement of waste activated sludge hydrolysis and volatile fatty acid accumulation at pH 10.0 [J]. *Water Research*, 2010, 44: 3329-3336.
- [15] Myunghee Lim, Younggyu Son, Mingcan Cui, et al. Effect of ultrasound on bisphenol A adsorption on the granular activated carbon [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49: 07HE10.
- [16] Ji-Tai Li, Mei Li, Ji-Hui Li, et al. Decolorization of azo dye direct scarlet 4BS solution using exfoliated graphite under ultrasonic irradiation [J]. *Ultrasonics Sonochemistry* 2007, 14: 241-245.
- [17] Liying Liu, Zhongwei Ding, Lijing Chang, et al. Ultrasonic enhancement of membrane-based deoxygenation and simultaneous influence on polymeric hollow membrane [J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 56: 133-142.
- [18] Emre Altun N, Jiann-Yang Hwang, Cahit Hicylmaz, Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment [J]. *International Journal of Mineral Processing* 2009, 91: 1-13.
- [19] Liang Heng, Nan Jun, He Wen-jie, et al. Algae removal by ultrasonic irradiation-coagulation [J]. *Desalination*, 2009, 239: 191-197.
- [20] Eric R. Holm, Dacid M. Stamper, Robert A. Brizzolara, et al. Sonication of bacteria, phytoplankton and zooplankton: application to treatment of ballast water [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56: 1201-1208.
- [21] Chih Wei Chen, How Ming Lee, Shiao Huei Chen, et al. Ultrasound-Assisted Plasma: A Novel Technique for Inactivation of Aquatic Microorganisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43: 4493-4497.
- [22] 郭洪光, 高乃云, 姚娟娟, 等. 超声波技术在水处理中的应用研究进展 [J]. *工业用水与废水* 2010, 6: 41(3): 1-4.
- [23] 吴国枝, 吴纯德, 张捷鑫, 等. 超声、臭氧、光催化及其组合工艺处理苯酚废水 [J]. *工业用水与废水* 2007, 38(5): 38-41.
- [24] 张萃, 李亚峰, 田西满. 超声波光催化氧化技术在废水处理中的研究进展 [J]. *工业用水与废水* 2009, 40(3): 16-18.
- [25] 胡文勇, 郝正. 超声波辐照下零价铁体系处理硝基氯苯废水的研究 [J]. *工业用水与废水* 2005, 36(4): 20-23.
- [26] Lei Zhao, Jun Ma, Xuedong Zhai, Synergetic Effect of Ultrasound with Dual Fields for the Degradation of Nitrobenzene in Aqueous Solution [J]. *Environmental Science & Technology* 2009, 43: 5094-5099.
- [27] Xikui Wang, Jingang Wang, Peiquan Guo, et al. Degradation of rhodamine B in aqueous solution by using swirling jet-induced cavitation combined with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2009, 169: 486-491.
- [28] Chih Wei Chen, How Ming Lee, Shiao Huei Chen, et al. Ultrasound-Assisted Plasma: A Novel Technique for Inactivation of Aquatic Microorganisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43: 4493-4497.
- [29] Naddeo V, Landi M, Belgiorno V, et al. Wastewater disinfection by combination of ultrasound and ultraviolet irradiation [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2009, 168: 925-929.
- [30] Beizhen Xie, Hong Liu, Yixin Yan, Improvement of the activity of anaerobic sludge by low-intensity ultrasound [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 260-264.
- [31] Mohammed Reza Salsabil, Audrey Prorot, Magali Casellas. Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility [J]. *Chemical Engineering Journal* 2009, 148: 327-335.
- [32] Pham T T H, Satinder K. Brar, Tyagi R D, et al. Ultrasonication of wastewater sludge—Consequences on biodegradability and flowability [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2009, 163: 891-898.
- [33] Zhaobing Guo, Ruo Feng, Ultrasonic irradiation-induced degradation of low-concentration bisphenol A in aqueous solution [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2009, 163: 855-860.
- [34] Bo Zhu, Linda Zou, Trapping and decomposing of color compounds from recycled water by TiO<sub>2</sub> coated activated carbon [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 3217-3225.
- [35] Eric R. Holm, Dacid M. Stamper, Robert A. Brizzolara, et al. Sonication of bacteria, phytoplankton and zooplankton: application to treatment of ballast water [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56: 1201-1208.