

喻艳菁, 丁国际, 邱慧琴, 等. 2009 超声处理对剩余污泥的粒径和溶出物的影响[J]. 环境科学学报, 29(4): 703-708

Yu Y J, Ding G J, Qiu H Q, et al. 2009 Effect of ultrasonic treatment on the particle size and dissolved substances of excess sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(4): 703-708

超声处理对剩余污泥的粒径和溶出物的影响

喻艳菁, 丁国际*, 邱慧琴, 王涌, 焦正

上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444

收稿日期: 2008-12-01 修回日期: 2009-02-21 录用日期: 2009-03-04

摘要: 为了有效地发挥微型动物摄食对剩余污泥的减量作用, 研究了超声声能密度和超声时间对剩余污泥的粒径和溶出物(蛋白质、多糖、DNA、COD及BOD)溶出的影响. 在脉冲比 2:1 和超声时间 10min 的条件下, 声能密度为 $0.2W \cdot mL^{-1}$ 时出现一个污泥粒径变化的转折点, 当小于转折点时污泥粒径随声能密度增加明显下降, 而当大于转折点时污泥粒径几乎不受声能密度影响. 在脉冲比 2:1 和声能密度 $0.8W \cdot mL^{-1}$ 的条件下, 超声时间 5min 是个转折点. 上清液中溶出物的浓度随超声波声能密度或超声时间的增加而增加, 各溶出物指标之间存在显著的相关关系. 溶出物指标中蛋白质指标可以较好地反映出污泥破解状态. 为了得到既能使污泥粒径变小到微型动物可摄食的程度又能使污泥中溶出物的溶出量最少的效果, 建议声能密度或超声时间取上述转折点为限值. 个数平均粒径 (D_n) 和重量平均粒径 (D_w) 分别反映了污泥的几何粒径变化和溶出物的溶出状况, 因此, 在超声破解污泥-微型动物摄食污泥的污泥减量工艺中可通过 D_n 和 D_w 的并用来决定剩余污泥超声处理的工艺参数.

关键词: 剩余污泥; 超声波处理; 粒径; 溶出物; 微型动物

文章编号: 0253-2468(2009)04-703-06 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

Effect of ultrasonic treatment on the particle size and dissolved substances of excess sludge

YU Yanjing, DING Guojī, QIU Huiqin, WANG Yong, JIAO Zheng

College of Environmental and Chemical Engineering of Shanghai University, Shanghai 200444

Received 1 December 2008 received in revised form 21 February 2009 accepted 4 March 2009

Abstract Microfauna can effectively consume particulate matter and minimize the sludge mass when the particle size is appropriate. This research investigated effects of ultrasonic density and treatment time on the particle size and concentrations of dissolved substances including protein, polysaccharide, DNA, COD and BOD of excess sludge. Under conditions of 2:1 pulse ratio and 10-minute treatment time, a turning point of the particle size of sludge existed at $0.2W \cdot mL^{-1}$. If below this point, the particle size of excess sludge decreased significantly with the increase of ultrasonic density. And if beyond this point, the particle size was hardly affected by the ultrasonic density. Under conditions of the same pulse ratio and $0.8W \cdot mL^{-1}$, a turning point existed at the treatment time of 5 minutes. Concentration of all dissolved substances in the supernatant increased with the ultrasonic density or treatment time. There were significant correlations between the concentrations of dissolved substances, and the protein concentration was used as an index to indicate the state of sludge disintegration. In order to meet the targets of both disintegrating excess sludge to the size appropriate for microfauna and minimizing the extraction of other substances in the sludge, ultrasonic density and treatment time should be controlled below the above turning points. Since number mean diameter and weight mean diameter of sludge particles reflect the change of geometrical diameter and the dissolution of sludge, they can be used to determine the appropriate ultrasonic density and treatment time in the ultrasonic treatment process of excess sludge for to excess sludge reduction by predatory activity of microfauna.

Keywords excess sludge; ultrasonic treatment; particle size; dissolved substance; microfauna

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (No. 2007AA06Z347); 上海市科委项目 (No. 072312002); 上海市重点学科第三期建设项目 (No. S30109)

Supported by the Hi-Tech Research and Development Program of China (No. 2007AA06Z347), the Program of Shanghai Municipal Commission for Science and Technology (No. 072312002) and the Shanghai Leading Academic Disciplines (No. S30109)

作者简介: 喻艳菁 (1985-), 女, E-mail: bvelyfish@shu.edu.cn * 通讯作者 (责任作者), E-mail: gjding@shu.edu.cn

Biography: YU Yanjing (1985-), female, E-mail: lovelyfish@shu.edu.cn * **Corresponding author:** E-mail: gjding@shu.edu.cn

1 引言 (Introduction)

在剩余污泥减量的各种方法中,利用微型动物摄食作用进行剩余污泥减量是一种理想的源头减量方法.它遵循生态学原理,通过食物链传递过程中能量的损失达到减量的效果,具有能耗低,无二次污染的优点 (Huang *et al.*, 2007; 梁鹏, 2004; Lapinski 2003; Ratsak *et al.*, 2006; Wei *et al.*, 2003; 2005; 2006). 不过,污泥是否能有效地被微型动物摄食受到污泥大小的制约,利用物理化学的方法破碎污泥有助于提高微型动物对污泥的摄食效率.超声波因其无污染、破解速率高等特点 (Bin, 1997), 目前正被广泛地应用于污泥破碎处理中 (Chu *et al.*, 2001; 沈劲锋等, 2006; Wang *et al.*, 2005). 然而,伴随着污泥的破碎,可能会造成污泥中对微型动物具有营养价值的物质溶出,其结果是既加重后续处理的负担,又使得作为微型动物食物的污泥的营养价值降低.本课题组其他一些相关研究工作表明,并非剩余污泥破解程度越高,微型动物的生长状况越好.鉴于此,为了达到既能保证使污泥破解到有利于被微型动物捕食,同时又尽可能减少污泥中溶解态物质的溶出,避免增加水处理负荷的目的,本文考察了不同超声条件下,剩余污泥粒径变化和剩余污泥中溶解态物质的溶出特性及不同指标间的相关性,以期能为超声破解污泥-微型动物摄食污泥的污泥减量工艺的合理运用提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验用泥

取自上海某城市污水处理厂剩余污泥.污泥经过重力沉降浓缩后的 MLSS 约为 9000mg L^{-1} .

2.2 超声波试验装置

超声波发生装置为 NY-92-II 型超声波细胞粉碎仪,超声频率为 20kHz ,可调节声能密度、超声时间以及超声间隔次数等超声条件.

2.3 污泥超声处理方法

取 500mL 的污泥样品于 800mL 烧杯中,将烧杯置于超声波仪内,使超声波变幅杆浸入烧杯内液面下 1cm ,调节各超声参数,常温下进行超声波处理.处理后的污泥,通过 9000r min^{-1} 转速下离心 15min 得到污泥上清液,用于各指标的测定.

2.4 不同声能密度和超声时间条件下的超声处理实验

2.4.1 声能密度 在超声脉冲比(单次工作时间和间歇时间之比)为 2:1,间歇超声作用 10min 的条件下,分别测定声能密度为 $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ 和 $1.3\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时的污泥粒径、上清液的蛋白质、多糖、DNA、COD 和 BOD 等指标.

2.4.2 超声时间 在超声脉冲比为 2:1,声能密度为 $0.8\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的条件下,分别测定间歇超声作用时间为 $1, 5, 10, 20, 30, 40$ 和 60min 时的污泥粒径、上清液的蛋白质、多糖、DNA、COD 和 BOD 等指标.

2.5 测试方法

蛋白质的测定采用考马斯亮蓝法,多糖的测定采用蒽酮-硫酸法(蔡春光等, 2004), DNA 的测定采用二苯胺法. COD 采用哈希微回流重铬酸钾法测定(丁文川等, 2006), BOD 采用 5 日培养法(国家环保局水和废水监测分析方法编委会, 2002), 污泥颗粒粒径根据离心沉降法的原理,采用 WQL 粒度仪进行测定.

3 结果 (Results)

3.1 超声波处理对污泥粒径的影响

在不同声能密度和超声时间的超声处理下,剩余污泥的个数平均粒径 (D_n) 和重量平均粒径 (D_w) 的变化分别如图 1 和图 2 所示.由图 1 可见,当声能密度升至 $0.2\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$, D_n 迅速从初始的 $34.3\mu\text{m}$ 变小至 $8.82\mu\text{m}$; 当声能密度大于 $0.2\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ 后, D_n 仅在 $7.50\sim 11.04\mu\text{m}$ 范围内波动. D_w 的变化趋势与 D_n 有所不同,声能密度小于 $0.8\text{W}\cdot\text{mL}^{-1}$ 前,明显地呈随声能密度的提高而下降的趋势,直到 0.8

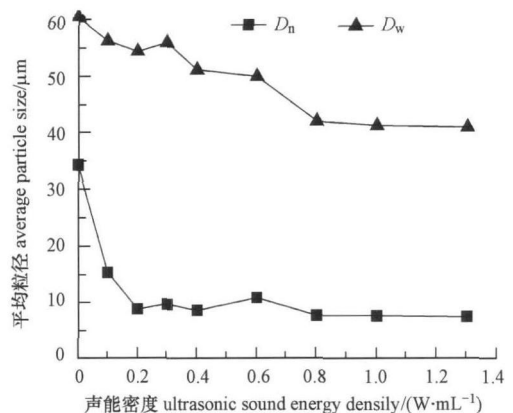


图 1 不同声能密度超声处理下的剩余污泥粒径变化

Fig 1 Variation of average particle size of excess sludge with different ultrasonic sound energy density treatments

$W \cdot mL^{-1}$ 之后才趋于平缓, 维持在 $41.0 \mu m$ 左右。

比较图 2 与图 1 可知, 不同超声时间作用下 D_n 和 D_w 的变化趋势与声能密度略有不同。超声时间在 5 min 之内, D_n 和 D_w 都呈明显的下降趋势, D_n 从 $9.85 \mu m$ 减少到 $6.94 \mu m$, D_w 从 $41.1 \mu m$ 减小到 $37.4 \mu m$ 。超声 5 min 之后, 虽然 D_n 和 D_w 有波动, 但均没有呈现出明显的下降趋势。

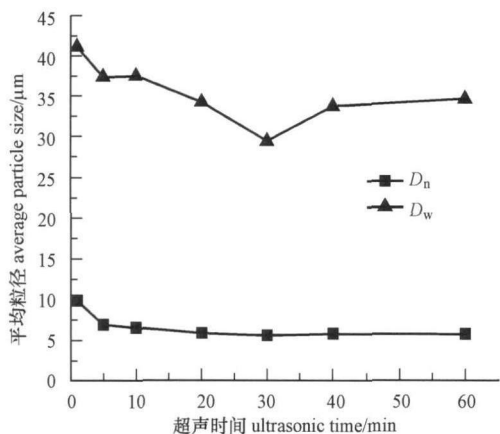


图 2 不同超声时间超声处理下剩余污泥粒径的变化

Fig 2 Variation of average particle size of excess sludge with different ultrasonic time treatments

3.2 声能密度对污泥溶出物的影响

不同声能密度的超声处理条件下, 上清液中污泥溶出物的浓度分别如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看出, 随着超声声能密度的增加, 3 种溶出物 (蛋白质、多糖及 DNA) 浓度虽均呈增加趋势, 但变化特点各不相同: DNA 浓度呈线性增加趋势, 蛋白质浓

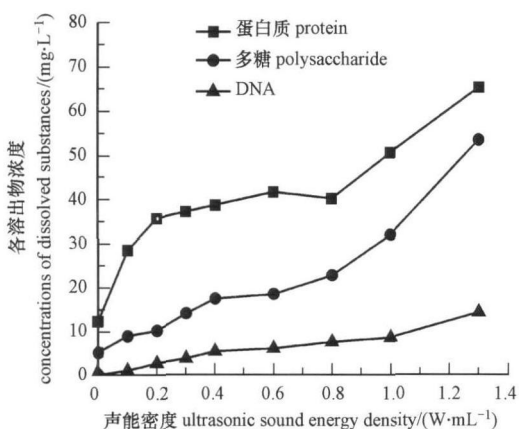


图 3 剩余污泥上清液中蛋白质、多糖、DNA 浓度随超声声能密度的变化

Fig 3 Variations of concentrations of protein, polysaccharide and DNA in the supernatant with different ultrasonic sound energy density treatments

度呈阶段性增加趋势, 而多糖浓度的变化趋势介于蛋白质和 DNA 之间。蛋白质浓度的变化呈现出 3 个阶段性: 在声能密度从 $0 W \cdot mL^{-1}$ 增至 $0.2 W \cdot mL^{-1}$ 这一阶段, 蛋白质浓度增加速度较快, 从 $12.4 mg \cdot L^{-1}$ 上升到 $35.9 mg \cdot L^{-1}$; 在声能密度为 $0.2 \sim 0.8 W \cdot mL^{-1}$ 的阶段, 蛋白质浓度增加速度缓慢, 从 $35.9 mg \cdot L^{-1}$ 上升到 $40.3 mg \cdot L^{-1}$; 而在声能密度为 $0.8 \sim 1.3 W \cdot mL^{-1}$ 这一阶段, 蛋白质浓度增加速度加快, 从 $40.3 mg \cdot L^{-1}$ 急剧上升至 $65.3 mg \cdot L^{-1}$ 。比较图 4 和图 3 可知, COD 的变化趋势介于蛋白质和多糖间, 而 BOD 的变化趋势与 DNA 相似。

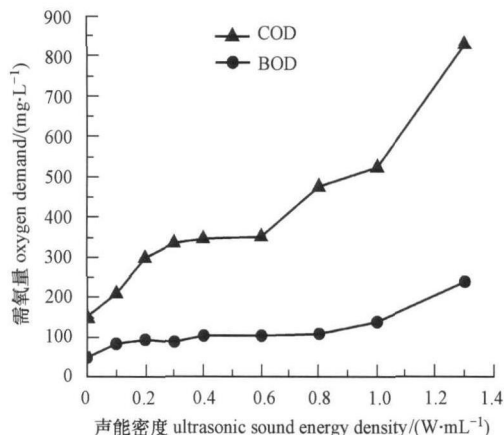


图 4 剩余污泥上清液中 COD 和 BOD 浓度随超声声能密度的变化

Fig 4 Variations of concentrations of COD and BOD in the supernatant with different ultrasonic sound energy density treatments

3.3 超声时间对污泥溶出物的影响

超声处理后污泥上清液中溶出物浓度随超声时间变化如图 5 和图 6 所示。从图 5 和图 6 可以看出, 随着超声时间的增加, 各溶出物浓度均呈现出上升的趋势。其中, 蛋白质浓度随超声时间增加的变化趋势与随声能密度增加的变化趋势相似, 同样呈现出三个阶段: 在超声时间 10 min 之前增加较快, 从 $13.8 mg \cdot L^{-1}$ 上升到 $44.7 mg \cdot L^{-1}$; 在超声时间 10 ~ 30 min 之间比较缓慢; 在 30 min 以后又较快增加, 从 $53.5 mg \cdot L^{-1}$ 上升到 $87.4 mg \cdot L^{-1}$ 。多糖和 DNA 浓度变化趋势相似, 在 5 min 之后, 增加均比较缓慢, 即使超声时间延长到 60 min, 上清液中的含量增幅也不是很大, 多糖和 DNA 浓度分别从 $5.81 mg \cdot L^{-1}$ 和 $2.33 mg \cdot L^{-1}$ 上升到 $31.1 mg \cdot L^{-1}$ 和 $14.4 mg \cdot L^{-1}$ 。COD 和 BOD 变化的转折点也出现在超声时间 10 min 处, 超声时间 10 min 之前增加较快, 分别从

61.0 mg L⁻¹和 21.3 mg L⁻¹上升到 207 mg L⁻¹和 181 mg L⁻¹; 10 min 之后增加幅度略有减缓, 经过超声处理 60 min 后, 分别上升到 563 mg L⁻¹和 361 mg L⁻¹.

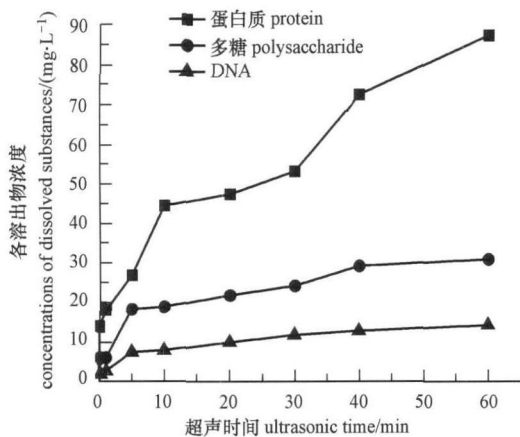


图 5 剩余污泥上清液中蛋白质、多糖、DNA 浓度随超声时间的变化

Fig 5 Variations of concentrations of protein polysaccharide and DNA in the supernatant with different ultrasonic time treatments

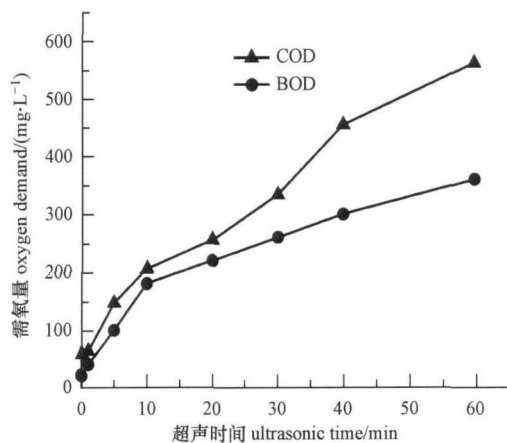


图 6 剩余污泥上清液中 COD 和 BOD 浓度随超声时间的变化

Fig 6 Variations of concentrations of COD and BOD in the supernatant with different ultrasonic time treatments

3.4 各指标间的相关性

从以上各图可以看出, 随着超声的声能密度和超声时间的增加, 污泥粒径均呈下降趋势, 而上清液中污泥溶出物浓度则均呈上升趋势. 为了考察这些指标之间是否有一定的相关性, 运用 SPSS 软件 (V16.0.1) 计算 Pearson 相关系数并进行相关性分析. 不同声能密度和超声时间条件下, 各指标之间的 Pearson 相关系数如表 1 和表 2 中所示. 由表 1 和表 2 可知, 在声能密度变化条件下和超声时间变化

表 1 声能密度变化条件下各指标之间的 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson's correlation coefficient between different indexes with different ultrasonic sound energy density treatments

指标	Polysaccharide	DNA	COD	BOD	D_n	D_w
Protein	0.918**	0.945**	0.937**	0.928**	-0.797*	-0.852*
Polysaccharide		0.978**	0.987**	0.978**	-0.517	-0.853*
DNA			0.985**	0.945**	-0.621	-0.906*
COD				0.970**	-0.596	-0.875*
BOD					-0.554	-0.781*
D_n						-0.666

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

表 2 超声时间变化条件下各 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson's correlation coefficient between different indexes with different ultrasonic time treatments

指标	Polysaccharide	DNA	COD	BOD	D_n	D_w
Protein	0.946**	0.951**	0.991**	0.985**	-0.661	-0.668
Polysaccharide		0.993*	0.941**	0.968**	-0.760*	-0.776*
DNA			0.951**	0.981**	-0.757*	-0.820*
COD				0.975**	-0.671	-0.691
BOD					-0.720*	-0.773*
D_n						-0.798*

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

条件下,各溶出物指标间均呈显著相关 ($p < 0.01$).而在声能密度变化条件下, D_n 基本上与各溶出物指标之间无相关性,但 D_w 与各溶出物指标之间却显著相关.在超声时间变化条件下 D_n 和 D_w 仅与多糖、DNA和 BOD呈现相关关系 ($p < 0.05$).

4 讨论 (Discussion)

粒径的大小对于微型动物的捕食行为来说是一个关键的因子,它直接影响着污泥颗粒的可被利用性.因此,超声处理条件与污泥粒径的大小关系,是采用物化破碎污泥-微型动物摄食的污泥减量工艺时首先要考虑的因素.由图 1和图 2可以看出,在超声脉冲比为 2:1,超声时间为 10min 的固定条件下,当超声声能密度小于 $0.2 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,表征颗粒外形大小的个数平均粒径 D_n 随声能密度增加迅速变小;当声能密度大于 $0.2 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,即使大幅度加大声能密度, D_n 也几乎不变小.由此可见 $0.2 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 是此条件下声能密度对污泥粒径作用的一个转折点,小于转折点时,声能密度对粒径作用明显;而大于转折点时,声能密度对粒径作用微弱.在超声脉冲比为 2:1,声能密度为 $0.8 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的固定条件下,超声时间为 5min 时也出现了一个转折点.比较这两个转折点值,可知转折点是随声能密度或超声时间的变化而发生变化.为了掌握声能密度与超声时间对转折点的影响规律,需要进行更系统的研究.由于超声处理只是在转折点内才能有效地粉碎污泥,从节省能量消耗角度考虑,超声粉碎污泥工艺条件应控制在转折点内.

从理论上讲,所有种类的微型动物的捕食作用均具有减少剩余污泥的效果.不过,从应用的角度看,适合剩余污泥减量用途的微型动物种类并不多,它们需要满足一些条件:能较长时间滞留在污泥处理反应器内而不会很快随处理水流走(附着生活型或匍匐生活型),具有较好的生长竞争能力(生态位较宽),以及具有较高的污泥减量效率(处于食物链较末端的位置).污水生物处理工艺中能较好地满足这些基本条件的微型动物主要有蠕虫和附着生活型的轮虫(Huang *et al.*, 2007; 梁鹏, 2004; Lapinski 2003; Wei *et al.*, 2003).与蠕虫相比,附着生活型的轮虫可摄食的颗粒粒径较小,适宜摄食的颗粒粒径一般在 $6 \mu\text{m}$ 以下(Lapinski 2003).在超声脉冲比为 2:1,超声时间为 10min 及声能密度为 $0.2 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时的转折点,以及在超声脉冲比为 2:1 超

声时间为 5min 及声能密度为 $0.8 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时的转折点,剩余污泥的 D_n 分别为 $8.82 \mu\text{m}$ 及 $6.94 \mu\text{m}$,这意味着超声破碎污泥的方法可以基本满足上述微型动物对颗粒粒径的要求,但对于可摄食粒径较小的附着生活型的轮虫而言并不是最佳的物化处理方法.至于超声粉碎污泥的适宜工况条件,应视采用的微型动物种类决定.

超声处理后上清液中污泥溶出物浓度体现了污泥中溶解态物质的溶出状况.随着超声声能密度增大或超声时间延长,上清液中各溶出物浓度均呈增加趋势,并且各溶出物之间均有显著的相关性 ($p < 0.01$).因此,考察剩余污泥营养物质溶出状况时,可以从上述指标中根据指标的易检测性和代表性选择一个或两个作为代表性指标,从而可以减少检测所需时间和费用.虽然从统计分析结果来看各溶出物两两之间均有显著相关性,但溶出物浓度随超声强度增加而变化的类型却有 3种:三阶段增加型、直线增加型、及介于上述两种增加型之间的类型.三阶段增加型溶出物浓度随超声强度增加的幅度均明显大于其他增加型.各溶出物指标中,蛋白质浓度变化具有较明显的三阶段增加特征.对照文献(Tiehm *et al.*, 1997),本研究观察到的蛋白质浓度随超声强度增加而形成的三个阶段也许对应着这么三个阶段:污泥絮体结构受到破坏使胞外聚合物溶出的第一阶段、通过破坏细胞壁的结构使细胞膜的通透性得到增强而引起部分细胞聚合物溶出的第二阶段,以及细胞被破碎使胞内聚合物溶出的第三阶段. Jorand 等(1995)进行了用超声波处理活性污泥的实验,实验结果显示在声能密度 $0.74 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的固定条件下,超声时间为 60s 时细胞溶解, 360s 后 DNA 得到全部释放,在一定程度上表明了超声波处理下细胞溶出物的变化具有阶段性.此外,文献报道蛋白质占污泥中总聚合物的 43% 以上,多糖占 10% ~ 18%, DNA 占 1% ~ 6% (Britt-Marie *et al.*, 2003).本研究结果同样表明了蛋白质是主要的污泥细胞聚合物.由于蛋白质能比其他指标更完整、更敏感地提供细胞破碎状态的信息,适宜作为表征污泥溶解态物质溶出状况的代表性指标.

超声声能密度变化实验结果显示了重量平均粒径 D_w 与各溶出物指标之间均有着显著的相关关系 ($p < 0.01$),这表明可以用 D_w 来表征超声处理下污泥中溶解态物质的溶出程度.在超声破碎污泥-

微型动物摄食污泥的污泥减量工艺中, 超声破碎工艺条件确定时需要综合考虑两个因素: (一)使污泥破碎到能被微型动物摄食; (二)使污泥溶解态物质的溶出量最少。 D_n 和 D_w 不仅能分别表征上述两个因素, 而且比溶出物的测定容易和快速得多, 因此, 在超声破碎污泥-微型动物摄食污泥的污泥减量工艺中, 可通过对 D_n 和 D_w 的并用来有效地决定剩余污泥超声处理的工艺参数。

5 结论 (Conclusion)

1) 在超声脉冲比为 2:1, 超声时间为 10min 的固定条件下, 当超声声能密度为 $0.2 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, 出现了一个污泥粒径变化的转折点。当小于该转折点时, 污泥粒径随声能密度增加而明显减小; 而当大于该转折点时, 即使声能密度增加很大也很难进一步减小污泥粒径。在超声脉冲比为 2:1, 声能密度为 $0.8 \text{ W} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的固定条件下, 当超声时间为 5min 时也出现了一个污泥粒径变化的转折点。在转折点得到的污泥粒径可基本满足微型动物对污泥粒径的摄食要求。

2) 上清液中各溶出物浓度随声能密度和超声时间增加而增加, 溶出物各指标之间存在显著的相关关系 ($p < 0.01$)。溶出物指标中, 蛋白质指标比其他指标能更好地反映出污泥的破解状态。

3) 个数平均粒径 D_n 和重量平均粒径 D_w 分别反映了污泥的几何粒径变化和溶解态物质溶出状况, 因此, 在超声破碎污泥-微型动物摄食污泥的污泥减量工艺中, 可通过对 D_n 和 D_w 的并用来决定剩余污泥超声处理的工艺参数。

责任作者简介: 匡际 (1955-), 男, 教授。主要从事水处理及水生态修复领域的研究。E-mail: gjding@shu.edu.cn

参考文献 (References):

Bien J, Wolny L. 1997. Changes of some sewage sludge parameters prepared with an ultrasonic field [J]. *Wat Sci Technol*, 36 (11): 101-106

Chu P C, Chang B V, Liao G S *et al*. 2001. Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge [J]. *Wat Res*, 35 (4): 1038-1046

蔡春光, 蔡伟民. 2004. 活性污泥胞外多聚物的提取及化学成分的研究 [A]. 第二届全国环境化学学术报告会 [C]. 上海: 上海交通大学, 71-74

Cai C G, Cai W M. 2004. Research on extraction method and chemical constituents of extracellular polymers [A]. The Second National

Symposium on Environmental Chemistry [C]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 71-74 (in Chinese)

丁文川, 龙腾锐, 许龙, 等. 2006. 低强度超声波处理对剩余污泥的影响 [J]. *重庆建筑大学学报*, (3): 74-77

Ding W C, Long T R, Xu L, *et al*. Effects of low-intensity ultrasound treatment on excess sludge [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, (3): 74-77 (in Chinese)

国家环境保护局. 2002. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 211-213

Environmental Protection Agency. 2002. Analysis in water and wastewater (the 4th edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 211-213 (in Chinese)

Huang X, Liang P, Qian Y. 2007. Excess sludge reduction induced by *Tubifex tubifex* in a recycled sludge reactor [J]. *Journal of Biotechnology*, 127: 443-451

Jorand F, Zartarian F, Thomas F, *et al*. 1995. Chemical and structural (2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs [J]. *Water Res*, 29: 1639-1647

Lapinski J, Tunnacliffe A. 2003. Reduction of suspended biomass in municipal wastewater using bdelloid rotifers [J]. *Water Research*, 37 (9): 2027-2034

梁鹏. 2004. 利用微型动物减少剩余污泥产生量的研究 [D]. 北京: 清华大学, 22-70

Liang P. 2004. Study on reduction of excess sludge production by microfauna [D]. Beijing: Tsinghua University, 22-70 (in Chinese)

Ratsak C H, Verkuiljen J. 2006. Sludge reduction by predatory activity of aquatic oligochaetes in wastewater treatment plants: science or fiction. A review [J]. *Hydrobiologia*, 564: 197-211

沈劲锋, 殷绚, 谷和平, 等. 2006. 超声波处理剩余活性污泥促进厌氧消化 [J]. *化工环保*, (4): 306-309

Shen J F, Yin X, Gu H P, *et al*. 2006. Ultrasonic treatment of excess activated sludge for improving its anaerobic digestion [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, (4): 306-309 (in Chinese)

Tiehm A, Nickel K, Neis U. 1997. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Water Science and Technology*, 36 (11): 121-128

Wang F, Wang Y, Ji M. 2005. Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, B123: 145-150

Wei Y S, Liu J X. 2005. The discharged excess sludge treated by Oligochaeta [J]. *Water Science and Technology*, 52 (10-11): 265-272

Wei Y S, Liu J X. 2006. Sludge reduction with a novel combined worm-reactor [J]. *Hydrobiologia*, 564: 213-222

Wei Y S, van Houten R T, Borger A R, *et al*. 2003. Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment [J]. *Water Research*, 37: 4453-4467

Wiln B M, Jin B, Lant P. 2003. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties [J]. *Water Research*, 37 (5): 2127-2139